IRREC : un système informatisé de calcul des besoins en irrigation pour les plants produits en récipients dans les pépinières forestières du Québec

Mémoire de recherche forestière n° 162
Direction de la recherche forestière

par

Daniel Girard, Jean Gagnon et Mohammed S. Lamhamedi

Québec

GIRARD, D., J. GAGNON et M. LAMHAMEDI, 2011. IRREC : *un système informatisé de calcul des besoins en irrigation pour les plants produits en récipients dans les pépinières forestières du Québec.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 162. 54 p.

ERRATA

(page-colonne-paragraphe-ligne)

5 - 2 - 2 - 8 Elles contribueront en partie aux calculs de conversion des pesées ou des nanosecondes (*MP-917*) en « %, v/v », puis en mm (L/m^2), ainsi qu'à la prise en compte d'autres facteurs, notamment la rétention de l'eau d'irrigation (le non ruissellement), selon le type de parois du récipient (pleines ou ajourées) ou de l'affaissement du substrat avec le temps (voir la section 2.1.1);

11 - figure 4 Devrait apparaître comme ceci :

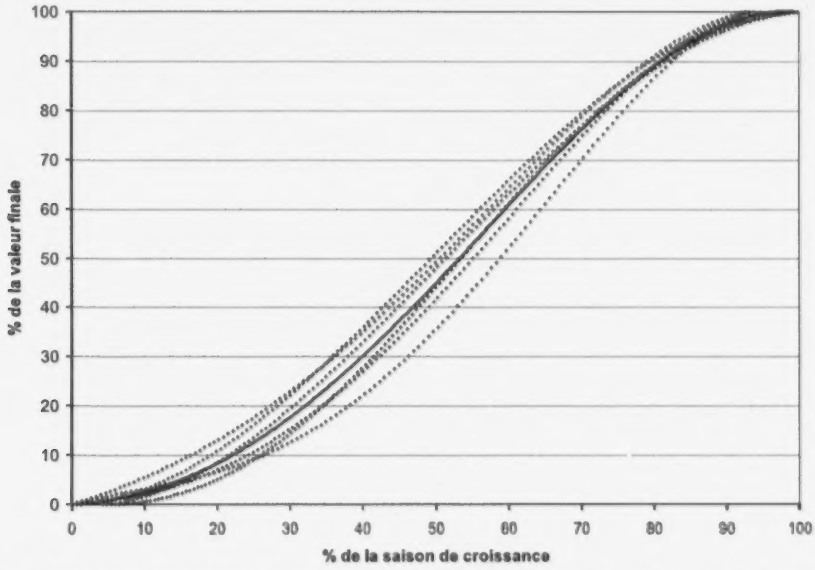


Figure 4. Profils d'évolution saisonnière des masses sèches des cultures 2+0 en récipients, toutes essences et récipients confondus (standards de PLANTEC, obtenus à partir de plus de 1000 points observés au cours d'une dizaine de saisons de croissance, tous types de cultures confondus). Un seul profil saisonnier (trait) a été retenu afin de représenter les cultures 2+0.

54 - encadré Devrait apparaître comme ceci :

Note : Les valeurs des longueurs de sondes et du rapport T[sol]/T[air] sont combinées à la longueur de sonde en contact avec le substrat (Tableau des caractéristiques des récipients; Figures 1d et 7) et à la lecture de temps (**ns**) pour calculer la teneur **en eau** du substrat (%, v/v) selon la formule suivante :

Teneur **en eau** (%, v/v) = 12,56*(((T-(2*(Ls - LsS)/VL))/(2*LsS/VL))-TsTair)
Ou :
T : Lecture "Time Delay" (**ns**)
Ls : Longueur de la sonde (mm)
LsS : Logueur de la sonde dans le substrat (mm)
VL : Vitesse de la lumière (299,704 mm/ns)
TsTair : Rapport Temps[sol] / Temps[air]

12,56 : Facteur lié à la constante diélectrique de l'eau

IRREC : un système informatisé de calcul des besoins en irrigation pour les plants produits en récipients dans les pépinières forestières du Québec

Mémoire de recherche forestière n° 162

par

Daniel GIRARD, techn. for.,

Jean GAGNON, ing.f., M. Sc.

et

Mohammed S. LAMHAMEDI, ing.f., M. Sc., *Ph. D.*

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2011

Mandat de la DRF

La Direction de la recherche forestière (DRF) a pour mandat de participer activement à l'amélioration de la pratique forestière au Québec en réalisant des travaux, principalement à long terme et d'envergure provinciale, qui intègrent des préoccupations de recherche fondamentale et appliquée. Elle subventionne aussi des recherches universitaires à court ou à moyen terme. Ces recherches, importantes pour le ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), sont complémentaires aux travaux de la DRF ou réalisées dans des créneaux où elle ne s'implique pas. Elle contribue à la diffusion de nouvelles connaissances, d'avis et de conseils scientifiques et à l'intégration de ces nouvelles connaissances ou savoir-faire à la pratique forestière.

Les mémoires de recherche forestière de la DRF

Depuis 1970, chacun des Mémoires de recherche forestière de la DRF est révisé par un comité *ad hoc* formé d'au moins trois experts indépendants. Cette publication est produite et diffusée à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation d'un projet ou d'une expérience. Ce document à tirage limité est également disponible dans notre site Internet en format pdf.

Vous pouvez adresser vos demandes à :

Ministère des Ressources naturelles et de la Faune
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein, Québec (Québec)
Canada, G1P 3W8
Courriel : recherche.forestiere@mrnf.gouv.qc.ca
Internet : www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche

© Gouvernement du Québec
On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Toutes les publications produites par la Direction de la recherche forestière, du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, sont protégées par les dispositions de la Loi sur le droit d'auteur, les lois, les politiques et les règlements du Canada, ainsi que par des accords internationaux. Il est interdit de reproduire, même partiellement, ces publications sans l'obtention préalable d'une permission écrite.

ISBN : 978-2-550-61315-2
ISBN (PDF) : 978-2-550-61316-9
F.D.C. 232.3
L.C. SD 404.3

Notes biographiques

Daniel Girard a obtenu un diplôme de technicien forestier au collège d'enseignement général et professionnel (Cégep) de Sainte-Foy en 1980. À l'emploi du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec depuis 1982, il travaille à la Direction de la recherche forestière (DRF) du MRNF depuis 1986. Il a étroitement contribué à l'implantation de l'informatique dans les pépinières forestières du Québec, à titre de concepteur principal des systèmes *SYSPAC* (SYStème de Planification et d'Analyse des Cultures) en 1986 et de *PLANTEC* (*PL*anification et *AN*alyse *TE*chnique des Cultures en pépinière) en 1992. Spécialisé en fertilisation et en irrigation des plants forestiers, ses travaux ont contribué à l'évolution des techniques en ces matières, tant pour les dispositifs de recherche que pour la production de plants à grande échelle.

Jean Gagnon est ingénieur forestier, diplômé de l'Université Laval depuis 1984 (il a en outre fait la troisième année de son baccalauréat à l'Université de la Colombie-Britannique [UBC]). En 1987, il obtient sa maîtrise en sciences forestières (M. Sc.) de l'Université Laval. Depuis 1987, Jean Gagnon est chargé de recherche à la Direction de la recherche forestière (DRF) du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec. Ses recherches visent à élaborer et mettre en place des mesures efficaces d'atténuation (régies d'irrigation et de fertilisation testées à l'aide de logiciels) du lessivage des éléments minéraux (nitrates et autres), en vue d'assurer une protection accrue de la qualité des eaux souterraines des pépinières forestières du Québec. Il étudie également les différents processus de transformations biochimiques des sources d'azote (ammonium, nitrate, urée) appliquées en pépinières, et leurs effets sur le lessivage des éléments minéraux et la croissance des plants cultivés en récipients et à racines nues. Il transfère les connaissances et l'expertise acquises auprès des pépinières forestières gouvernementales et privées du Québec, notamment comme membre de divers groupes techniques du MRNF et du *Comité environnement des pépinières du MRNF*, depuis sa création en 2002.

Notes biographiques (fin)

Soulignons qu'en 1988, Jean Gagnon a été choisi pour effectuer un stage de huit mois en France au Centre INRA (Institut National de la Recherche Agronomique) de recherche forestière de Nancy, dans le cadre d'un programme de coopération franco-québécois. Ce stage portait sur la fertilisation et la mycorhization du chêne rouge cultivé en récipients.

Mohammed S. Lamhamedi a obtenu son diplôme d'agronomie générale à l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II (IAV Hassan II) du Maroc en 1983. En 1985, ce même établissement lui décernait le diplôme d'ingénieur agronome d'État spécialisé en sciences forestières (M. Sc.). En 1991, l'Université Laval (Québec, Canada) lui décerne son doctorat en sciences forestières (*Ph. D.*). Après avoir été enseignant-chercheur en écophysiologie et en plantations forestières à l'IAV Hassan II de 1986 à 1991, il effectue un stage postdoctoral à l'Institut de recherche en biologie végétale de l'Université de Montréal. Il devient ensuite chercheur visiteur au Centre de foresterie des Laurentides du Service canadien des forêts en 1993-1995, puis en 1996-1997, directeur scientifique dans le cadre du projet d'installation de pépinières modernes financé par la Banque mondiale en Tunisie [Pampev Internationale - Direction générale des forêts, Tunisie]. De plus, M. Lamhamedi a été attaché de recherche au Centre de recherche en biologie forestière (Université Laval) en 1998-1999. En 1999, il devenait membre de l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec (OIFQ), après avoir complété sa formation universitaire en sciences forestières exigée par cet ordre.

Chercheur émérite à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec depuis juin 1999, il est aussi chercheur associé au Centre d'étude de la forêt (CEF) et professeur associé à deux facultés de l'Université Laval (Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique et Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation). Il agit à titre de rédacteur adjoint à la revue canadienne de recherche forestière depuis janvier 2006 et membre permanent du comité de lecture de la revue Nature et Technologie depuis novembre 2010. Il est l'auteur de plusieurs publications scientifiques et techniques, et dirige ou codirige des étudiants gradués à la maîtrise et au doctorat. Son expertise porte sur l'optimisation des régies de culture, la conception des standards de tolérance au gel des plants dans les pépinières forestières, la variabilité clonale des feuillus et des résineux, l'embryogenèse somatique des conifères, le bouturage des feuillus et des résineux et la production de plants dans les pépinières forestières. M. Lamhamedi s'occupe également du transfert d'expertise, de connaissances, du savoir-faire et de l'accompagnement auprès des 20 pépinières forestières (6 gouvernementales et 14 privées) du Québec. De plus, sa participation à différents projets de modernisation des pépinières forestières et de lutte contre l'ensablement dans des pays en développement (Tunisie, Ghana, Nicaragua, Maroc, etc.) lui a valu une renommée mondiale pour l'adaptation de l'expertise québécoise et canadienne à la production de plants.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel technique des pépinières du ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec, pour leur contribution significative à la conception de *IRREC*, particulièrement Mme Marie-Paule Lemerise (pépinière de Trécesson), pour son apport à la version « production » de *IRREC*, M. Pierre Comtois (pépinière de Normandin), pour sa contribution très significative à la conception, ainsi que Mme Chantal Pelletier (pépinière de Grandes-Piles), pour la rigueur dont elle a fait preuve lors de la mise à l'essai de *IRREC* dans des conditions de production à grande échelle. Les auteurs remercient également les trois évaluateurs anonymes pour la critique du document. Ils tiennent aussi à remercier M. Pierre Bélanger, Mme Denise Tousignant et M. Mario Renaud (DRF) pour la révision et l'édition de l'ouvrage, ainsi que Mmes Sylvie Bourassa, Josianne Martin et Maripierre Jalbert (DRF) pour la mise en page de ce mémoire.

Résumé

Depuis 2008, les pépinières forestières publiques du Québec ont à leur disposition un logiciel de calcul des besoins en irrigation des cultures en récipients : *IRREC* (Système de calcul des besoins en *IR*rigation pour les plants forestiers en *RÉC*ipient). *IRREC* est une feuille de calcul « *Excel* » conçue sur la base des méthodes de calcul des besoins d'irrigation, mises au point dans le cadre des dispositifs expérimentaux implantés dans les pépinières forestières publiques du Québec. Lorsque les teneurs en eau volumétriques du substrat (%, v/v) des plants en récipients sont en deçà d'un minimum fixé par le pépiniériste, *IRREC* calcule automatiquement les besoins d'irrigation nécessaires pour atteindre une valeur ciblée de teneur en eau du substrat. Ce logiciel assure ainsi une réserve d'eau du substrat optimale pour la croissance des plants produits en récipients, tout en limitant les pertes d'eau et de minéraux par lessivage. *IRREC* peut calculer les teneurs en eau volumétriques du substrat à partir de deux types de mesures : 1) des masses, converties en « %, v/v » à l'aide des variables mémorisées dans le système ou 2) des mesures prises à l'aide d'un appareil *MP-917*, qui utilise la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT).

Les besoins d'irrigation des cultures en récipients calculés par *IRREC* sont exprimés en minutes ou en nombre de passages de la rampe d'arrosage, selon le type de système d'irrigation utilisé. *IRREC* permet de saisir en pépinière des mesures de teneurs en eau du substrat (masse des récipients ou RDT) au moyen d'un ordinateur de poche, doté du système d'exploitation « *Windows Mobile* » et du logiciel « *Excel Mobile* ». Les mesures saisies dans « *Excel Mobile* » sont ensuite transférées vers l'ordinateur de bureau avec un minimum d'interventions de la part de l'usager, ce qui permet à des non-initiés de faire fonctionner facilement le système *IRREC* avec un minimum d'erreurs. En une seule opération, *IRREC* permet de calculer facilement les besoins d'irrigation de multiples cultures (essences, âges, types de récipients ou phases de croissance différents), de visualiser l'évolution saisonnière des teneurs en eau du substrat et d'archiver toutes les informations saisies et traitées par le système. Le logiciel *IRREC* a été testé dans deux pépinières forestières gouvernementales du Québec (Normandin et Grandes-Piles, DGPSP, MRNF), sur plusieurs essences résineuses produites en récipients, durant deux saisons de croissance. Avec l'usage de paramètres de gestion de l'irrigation bien adaptés au contexte opérationnel de production, *IRREC* a permis d'effectuer une gestion efficace des besoins en eau des différentes essences forestières en récipients, tout en assurant une protection accrue de la qualité des eaux souterraines.

Mots clés : irrigation, fertilisation, eaux souterraines, substrat, environnement, logiciel, outil informatique, pépinière forestière

Pour de plus amples informations sur *IRREC* ou obtenir le logiciel (disponible en version française seulement, sur cédérom ou sur fichier téléchargeable de 45 Mo, au choix), prière de contacter le premier auteur de ce mémoire à l'adresse suivante : daniel.girard@mrnf.gouv.qc.ca en lui fournissant vos coordonnées.

Abstract

Since 2008, Québec's public forest nurseries have utilized IRREC *software, a system for calculating the irrigation requirements of containerized forest tree seedlings.* IRREC *is an Excel spreadsheet designed on the basis of calculation methods for irrigation requirements, which were developed from field experiments conducted in Québec's public forest nurseries. When the substrate volumetric water content of containerized seedlings (%, v/v) goes below the minimal value determined by the nurseryman,* IRREC *automatically calculates the irrigation requirements necessary to reach a targeted value of substrate water content. Therefore, this software ensures an optimal substrate water supply for the growth of containerized seedlings, while minimizing water and nutrient leaching losses.* IRREC *can calculate the substrate water content from two types of measurements : 1) mass, converted to « %, v/v » using variables stored in the system or 2) volumetric water content levels, measured using an* MP-917, *a device that relies on time domain reflectometry (TDR). The irrigation requirements of container-grown seedlings calculated by* IRREC *are expressed either in minutes or in number of passes of a mobile boom, according to the type of irrigation system used.* IRREC *allows for the acquisition of substrate water content data (container mass or TDR) measured in the nursery using a pocket computer equipped with the «* Windows Mobile *» operating system and «* Excel Mobile *» software. The measurements recorded in «* Excel Mobile *» are subsequently transferred to a desktop computer with minimal intervention from the user. This allows non-specialists to operate the system easily and with a minimum of errors. In a single operation,* IRREC *easily calculates the irrigation requirements of different container-grown seedling productions (various species, ages, container types, growth phases, etc.), to visualize the seasonal evolution of substrate water content and to archive all of the information entered and processed by the system.* IRREC *software has been tested in two governmental forest nurseries in Québec (Normandin and Grandes-Piles, DGPSP, MRNF) on different coniferous species grown in containers over two growing seasons. By using irrigation management parameters well adapted to an operational scale,* IRREC *permitted water management to be optimized while addressing the water needs of different containerized forest species, thus ensuring a greater protection of groundwater quality.*

Keywords : Irrigation, fertilization, groundwater, substrate, environment, software, computer tool, forest nursery.

For more information about IRREC *or to obtain the software, please contact the first author of this paper at the following email address :* daniel.girard@mrnf.gouv.qc.ca, *mentioning your coordinates, as well as your preference for receiving the file either as a CD-ROM or as a direct downloadable file (45 Mo).*

Table des matières

page

Résumé vii

Abstract ix

Liste du tableau xiii

Liste des figures xv

Liste des annexes xvii

Introduction 1

Chapitre premier – Matériel et méthodes 3

1.1 Rappel succinct de quelques notions sur l'irrigation dans le continuum sol-plante-atmosphère 3

1.2 Les conditions requises pour utiliser *IRREC* 3

1.2.1 Maîtrise de la méthode de mesure de la teneur en eau du substrat 4

1.2.2 Intensité d'échantillonnage et répartition spatiale des mesures 4

1.2.3 Fréquence d'échantillonnage 4

1.2.4 Maîtrise des systèmes d'irrigation 5

1.3 Schéma de fonctionnement de *IRREC* 5

1.4 Choix de la méthode de mesure de la teneur en eau du substrat et modalités de conversion . 7

1.4.1 Conversion des mesures par RDT en « %, v/v » 8

1.4.2 Conversion des mesures par pesée en « %, v/v » 9

1.4.2.1 Évolution saisonnière de la masse sèche des plants 10

1.4.2.2 Évolution saisonnière de la teneur en eau des tissus 10

1.5 Calcul des besoins d'irrigation 12

1.5.1 Correction et conversion selon le type de récipient 12

1.5.2 Correction relative aux propriétés hydrophobes de la tourbe sèche 12

1.5.3 Correction relative au débit du système d'irrigation 13

1.5.4 Correction relative aux facteurs météorologiques prévalant lors de l'irrigation 13

1.5.5 Correction en fonction des précipitations anticipées 14

1.5.6 Synthèse du calcul des besoins d'irrigation des cultures en récipients 15

page

Chapitre deux – Les entrées 17

2.1 Données à caractère permanent 17

2.1.1 Caractéristiques des récipients 17

2.1.2 Masse sèche et rapport « masse fraîche/masse sèche » 19

2.1.3 Caractéristiques des sondes RDT 20

2.1.4 Courbes d'évolution de la rétention d'eau du substrat en fonction de sa teneur en eau initiale 20

2.1.5 Systèmes d'irrigation 20

2.2 Entrées quotidiennes 22

2.2.1 Liste des cultures et des variables de contrôle de l'irrigation 22

2.2.2 Saisie des données de terrain 24

2.2.3 Conditions météorologiques 24

Chapitre trois – Les sorties 27

3.1 Portrait graphique des teneurs en eau du substrat et paramètres de contrôle 27

3.1.1 Portrait global des cultures 27

3.1.2 Portrait ciblé d'une culture à la fois 28

3.2 Prescriptions d'irrigation 28

3.3 Archivage des informations 30

3.3.1 Archivage des observations de terrain 30

3.3.2 Archivage des statistiques quotidiennes 30

Chapitre quatre – Modes de fonctionnement et cadre d'utilisation de IRREC 31

4.1 Mode sécurisé 31

4.2 Mode ouvert 31

4.2.1 Personnalisation des paramètres du système 31

4.3 Option de saisie et de calcul sur le terrain (*IRREC mobile*) 31

4.4 Traitement des informations complémentaires (bordures et remarques) 32

Conclusion 33

Références bibliographiques 35

Liste du tableau

page

Tableau 1. Facteurs de correction reliés aux conditions météorologiques. Un niveau est sélectionné pour chacun de ces paramètres. À chaque niveau d'un paramètre correspond un facteur. Le produit de ces facteurs donne le facteur global qui permet d'estimer les pertes d'eau lors de l'irrigation 13

Liste des figures

page

Figure 1. Le schéma de fonctionnement de *IRREC* 6

Figure 2. Appareil portatif (*MP-917*) de mesure de la teneur en eau volumétrique du substrat (%, v/v) par réflectométrie dans le domaine temporel (RDT) 8

Figure 3. Exemple de peson numérique pouvant servir à mesurer la teneur en eau du substrat par gravimétrie dans les productions à grande échelle 9

Figure 4. Profils d'évolution saisonnière des masses sèches des cultures 2+0 en récipients, toutes essences et récipients confondus 11

Figure 5. Exemple d'une courbe d'évolution du rapport « masse fraîche / masse sèche » des plants (2+0) pendant la saison de croissance 11

Figure 6. Tableau satellite des caractéristiques des récipients, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1d) 18

Figure 7. Tableau satellite de la masse des plants, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1e) 18

Figure 8. Exemple d'une courbe de rétention d'eau en fonction de la teneur en eau initiale du substrat, utilisée par *IRREC*, telle qu'elle apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1g) 21

Figure 9. Tableau central de *IRREC*, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1b) 23

Figure 10. Tableau de saisie des mesures effectuées sur le terrain, sur l'ordinateur de poche et sur le PC, tel qu'il apparaît à l'écran de chacun des ordinateurs (voir aussi la figure 1a) ... 25

Figure 11. Graphique de surveillance de l'état de la teneur en eau du substrat, selon les plus récentes mesures, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir la figure 1i et la section 3.1.1) 27

Figure 12. Suivi de l'évolution des teneurs en eau d'une culture à la fois, au cours des 14 derniers jours (moyennes, valeurs minimales et maximales mesurées sur le terrain) 28

Figure 13. Tableau de prescription d'irrigation produit par *IRREC*, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir la figure 1i) 29

Figure 14. Page d'accueil de *IRREC* 31

Liste des annexes

page

Annexe 1. Liste de toutes les variables du tableau central (Figures 1b et 9)..... 39

Annexe 2. Liste des variables du tableau des caractéristiques des systèmes d'irrigation (Figure 1c).. 50

Annexe 3. Liste des variables du tableau des caractéristiques des récipients (Figures 1d et 6)..... 51

Annexe 4. Liste des variables du tableau d'évolution des masses sèches (« biomasses ») (Figures 1e et 7)..... 53

Annexe 5. Liste des variables du tableau de description des sondes RDT (Figures 1f)..... 54

Introduction

Au Québec, les plants forestiers destinés au reboisement sont actuellement produits dans 6 pépinières publiques (Direction générale des pépinières et des stations piscicoles [DGPSP] du ministère des Ressources naturelles et de la Faune [MRNF]) et dans 14 pépinières privées de l'OPPFQ (Office des producteurs de plants forestiers du Québec). En 2009, ces 20 pépinières ont produit un total de 126 millions de plants (J. Arseneault, DGPSP, comm. pers., 2009) dont 94% étaient cultivés en récipients.

Les décisions des pépiniéristes du Québec en matière d'irrigation reposent souvent sur des bases plus ou moins subjectives, tels les critères visuels (flétrissement local, aspect des mottes de substrat tourbeux, etc.) ou tactiles (perception d'humidité excessive ou non sous les mottes). Cela s'explique par l'absence d'outil d'aide à la décision en matière d'irrigation. La conception de logiciels comme *PLANTEC* en 1993, suivi de *Plantec 2* en 2006, a amélioré de façon significative les pratiques de fertilisation des plants en récipients, ce qui a contribué à produire des plants de haute qualité morpho-physiologique. Toutefois, ces logiciels n'ont pas de fonctions qui permettent de prescrire des irrigations adaptées aux différents stades de croissance des plants produits en récipients. Cela nous a donc amené à mettre au point une nouvelle méthode de calcul des besoins d'irrigation des cultures en récipients.

Le système *IRREC* permet de calculer les besoins d'irrigation des cultures de façon précise, tout en tenant compte des différentes variables environnementales. Conçu à l'aide du logiciel *Excel* pour une plus grande souplesse de développement, il demeure facilement utilisable par le pépiniériste, et contribuera à assurer une protection accrue de la qualité des eaux souterraines des pépinières forestières.

Évolution des technologies

Au cours des 25 dernières années, les pratiques culturales (fertilisation, irrigation, etc.) utilisées pour la production des plants en récipients dans les pépinières forestières du Québec ont beaucoup évolué (Gingras *et al.* 1999; Girard *et al.* 1993, 1995; Langlois 1986, 1987, 1988a et b, 1991; Langlois et Gagnon 1987, 1988a et b, 1990a et b, 1993). Au début de la décennie 1990, *PLANTEC*, le premier logiciel sophistiqué de gestion de la fertilisation, a été développé par la Direction de la recherche forestière (DRF) du MRNF (Langlois et Gagnon 1993; Girard *et al.* 1993, 1995, 2001). Plus tard, *Plantec 2* (Gingras et Gagnon 2003, Gingras et Déziel 2006, Gingras *et al.* 2007), une version plus évoluée de *PLANTEC*, a été conçu à la DGPSP (avec la collaboration étroite de MM. Jean-Yves Allard, Pierre Comtois et Jean-Yves Guay) pour permettre aux pépiniéristes du Québec de gérer encore plus efficacement la fertilisation des plants produits en récipients. Toutefois, ces logiciels ne disposent que de fonctions de mémorisation des irrigations exécutées et ne permettent pas de gérer l'irrigation des plants.

Durant cette période, de nouveaux appareils ont été mis au point pour mesurer la teneur en eau des mélanges de tourbe et de vermiculite utilisés au Québec comme substrats de culture pour les plants produits en récipients : pesons (balances) numériques pour la pesée des récipients, tensiomètres, appareil *MP-917*. Le contexte était donc propice à la conception d'un logiciel qui remplirait le même rôle, en matière d'irrigation, que celui joué par *PLANTEC* et *Plantec 2* en matière de fertilisation, tout en tenant compte des particularités de la production à grande échelle de plants forestiers au Québec.

Des recherches ciblant l'irrigation des plants en récipients (Lambany *et al.* 1996, 1997) avaient d'abord permis d'élaborer une méthode précise et efficace de mesure de la teneur en eau volumétrique du substrat à l'aide du *MP-917* (ESI Environmental Sensors Inc., Victoria, C.-B.). Le fonctionnement de cet appareil repose sur le principe de la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT) (Topp et Davis 1985). Cette méthode de mesure est maintenant bien maîtrisée pour les cultures en récipients, produites dans des substrats constitués principalement d'un mélange de tourbe et de vermiculite (Lamhamedi *et al.* 2002).

Des travaux de recherche plus récents, effectués dans plusieurs pépinières forestières du Québec, ont permis d'évaluer les effets de différentes teneurs en eau volumétriques du substrat sur : 1) la croissance des plants d'épinette noire (1+0) et d'épinette blanche (1+0) et (2+0), 2) la nutrition

minérale, 3) les relations hydriques des parties aériennes et des racines et 4) le lessivage des éléments minéraux (Bergeron *et al.* 2004, Gagnon et Girard 2001, Lamhamedi et Gagnon 2003, Gagnon 2009, Gagnon et Girard 2009). D'autres recherches ont aussi permis d'identifier les seuils de teneur en eau volumétriques à maintenir dans le substrat des plants en récipients produits dans les pépinières forestières du Québec, selon leurs stades de croissance 1+0 et 2+0 (germination, croissance en hauteur, endurcissement, etc.) (Lamhamedi *et al.* 2000, 2001, 2003, 2006; Lamhamedi et Gagnon 2003; Stowe *et al.* 2001, 2010).

Afin de proposer une solution de rechange moins coûteuse à la mesure des teneurs en eau du substrat à l'aide du *MP-917*, *IRREC* offre la possibilité d'utiliser la pesée des récipients (par exemple des pesons numériques). Cette méthode est parfaitement adaptée aux cultures en récipients 1+0, en raison de la faible masse fraîche des plants par rapport à celle du substrat, de la silice et du récipient. Par contre, dans le cas des plants 2+0 où la masse devient progressivement plus importante tout au long de la saison de croissance, son utilisation devient plus complexe. *IRREC* propose donc une méthode originale d'évaluer la masse fraîche des plants, laquelle fait appel à la masse sèche des plants, combinée à des rapports « masse fraîche/masse sèche » propres à chaque genre (*Picea*, *Pinus*, *Larix*,...).

Une troisième méthode de mesure, celle des tensiomètres, est aussi envisageable. Bien que les tensiomètres produisent des résultats rigoureux, leur utilisation est encore trop peu connue pour qu'ils soient intégrés à *IRREC*. De plus, leur usage est pour l'instant limité aux productions de plants de fortes dimensions (PFD) dans des cavités de volumes supérieurs à 300 cm^3.

Depuis 2000, des expériences ont été effectuées en pépinières sur le lessivage des nitrates (NO_3^-) et autres minéraux (autres formes de N: NH_4^+, urée, ainsi que P, K, Ca, Mg) sous des cultures extérieures en récipients de plants de fortes dimensions (PFD) d'épinette blanche 2+0. Ces expériences ont permis de mesurer, de façon continue, la teneur en eau volumétrique du substrat des PFD en récipients, en reliant le *MP-917* à un système d'acquisition de données (modèle CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah, USA) (Gagnon et Girard 2001). Ces suivis ont facilité la mise au point et la vérification de la méthode de calcul des besoins d'irrigation des cultures en récipients proposée par *IRREC* (Girard 2008, 2009).

Développement du système *IRREC*

La méthode de calcul mise au point a été transposée dans une feuille de calcul *Excel* (*Microsoft Corporation*). Depuis, le système de calcul *IRREC* (Girard 2010) a été l'objet de vérifications à grande échelle dans deux pépinières forestières gouvernementales (Normandin et Grandes-Piles; DGPSP, MRNF) durant deux saisons de croissance, en utilisant des mesures de teneurs en eau obtenues par pesées ou avec le *MP-917*. Ces vérifications ont permis de faire les ajustements utiles au bon fonctionnement du système, tout en prenant en compte les contraintes d'opération des pépiniéristes.

Bien que le système *IRREC* soit pleinement fonctionnel, il conserve des caractéristiques propres à un système en cours d'élaboration. Certains des paramètres de calcul sont pour l'instant peu documentés et ne sont utilisés que pour offrir un maximum de possibilités. Si leur utilité se révélait négligeable, ils pourraient être éliminés.

Le présent mémoire de recherche a comme objectif de faire connaître le fonctionnement du système *IRREC*, conçu pour le calcul des besoins d'irrigation des plants forestiers produits en récipients. Le premier chapitre (matériel et méthodes) décrit le contexte dans lequel *IRREC* doit être utilisé, de même que les principes de calcul qui régissent son fonctionnement. Le second chapitre (entrées) met l'accent sur les variables et les paramètres qui doivent être fournis au système, afin d'adapter le calcul des besoins d'irrigation à chaque situation. Le troisième chapitre (sorties) explique comment interpréter et utiliser les résultats produits par *IRREC*. Finalement, le quatrième chapitre (modes de fonctionnement) fournit des informations factuelles sur l'utilisation du système.

Chapitre premier

Matériel et méthodes

1.1 Rappel succinct de quelques notions sur l'irrigation dans le continuum sol-plante-atmosphère

Le substrat de culture des plants en récipients produits dans les pépinières forestières du Québec est généralement composé d'un mélange de tourbe et de vermiculite, auquel peut s'ajouter de la perlite, au besoin, lorsque la texture de la tourbe est trop fine. Sur le plan physiologique, la capacité des plants à prélever l'eau dans le substrat dépend de la force avec laquelle celle-ci est retenue dans les pores du substrat. Cette tension hydrique correspond à un potentiel matriciel provoqué par des phénomènes de capillarité et d'absorption-adsorption de l'eau sur les particules du substrat; c'est donc la mesure de la disponibilité de l'eau dans ce milieu, qui influence à son tour le stress hydrique du plant à différents stades de croissance.

Les racines des plants doivent exercer une succion dans le sol pour utiliser l'eau. Plus la tension du substrat est élevée, plus le plant aura de la difficulté à puiser l'eau dont il a besoin. À l'inverse, plus il y a d'eau dans le substrat, moins cette tension sera élevée. Une tension trop faible peut, par ailleurs, provoquer le lessivage des éléments nutritifs (N, P, K, Ca et Mg) indispensables à la croissance des plants. La quantité d'eau à appliquer s'exprime cependant plus facilement par volume que par tension. Or, il est essentiel de connaître la quantité d'eau qu'il faut appliquer si l'on veut maintenir une tension optimale et permettre au plant d'absorber l'eau et les différents éléments minéraux avec un minimum d'énergie, tout en conservant les minéraux à la portée des racines des plants.

Bien qu'au cours de la saison, le flétrissement des plants en phase de croissance en hauteur soit un facteur physiologique couramment observé en pépinière, il n'est pas formellement pris en compte par *IRREC*. En effet, le point de flétrissement ne dépend pas seulement de la teneur en eau du substrat (et de la tension hydrique); il dépend surtout de la transpiration des plants et de l'évolution instantanée des principales variables environnementales (principalement la température, l'humidité relative et la vitesse du vent), lesquelles exercent un effet direct sur l'évaporation. Si la teneur en eau du substrat est faible mais non limitative, des plants soumis à des conditions chaudes et ensoleillées montreront des symptômes de flétrissement apical pendant le jour, puis se redresseront pendant la nuit, sans que la culture ne nécessite un apport d'eau. La nuit, en effet, la demande évaporatoire est réduite en raison de la diminution significative de l'évapotranspiration nocturne (faible température, humidité relative élevée, etc.). Pendant cette période, le potentiel hydrique du xylème du plant s'équilibre avec celui du substrat. Pour cette raison, on peut utiliser le potentiel hydrique de base (pré-aube) du xylème (échantillonnage destructif des plants, avant le lever du soleil) comme un indicateur du potentiel hydrique du sol.

L'apparition d'un problème de flétrissement localisé des plants pour une culture en récipients dépend de facteurs qui ne peuvent évidemment pas être corrigés par un logiciel. Ce problème pourra plutôt être résolu par une connaissance précise de la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat générées par les systèmes d'irrigation utilisés dans les pépinières (Caron 2001, Lamhamedi *et al.* 2006). Par contre, si le flétrissement est généralisé et récurrent, les paramètres de gestion de l'irrigation (seuil inférieur et cibles des teneurs en eau) devront alors être réajustés.

1.2 Les conditions requises pour utiliser *IRREC*

La version actuelle du logiciel *IRREC* gère les irrigations à un instant donné, c'est-à-dire au moment où les mesures de teneurs en eau du substrat sont prises sur le terrain. Les variables (teneurs en eau, météo, etc.) qui guident les calculs des besoins d'irrigation devraient donc idéalement être surveillées quotidiennement.

Les calculs de *IRREC* sont basés sur les données mesurées sur le terrain. Pour obtenir des prescriptions d'irrigation qui répondent parfaitement aux besoins en eau des plants en récipients, le pépiniériste doit alimenter le système par des données fiables et précises, pour chacune de ces cultures. Une méthode de mesure adéquate et un échantillonnage rigoureux de chacune des cultures sont donc essentiels. Si les mesures saisies dans le système ne sont pas représentatives de l'état réel des teneurs en eau du substrat des cultures, les prescriptions d'irrigation ne seront pas fiables.

De plus, il est important de bien exécuter la prescription d'irrigation sur le terrain et aussi, de tester régulièrement l'efficacité des systèmes d'irrigation utilisés en pépinière, afin de s'assurer du succès de l'irrigation. Cette approche permettra de vérifier si la quantité d'eau réellement reçue par la culture correspond à celle prescrite par *IRREC*, ainsi que de valider les paramètres de correction liés aux pertes d'eau causées par le vent.

1.2.1 Maîtrise de la méthode de mesure de la teneur en eau du substrat

IRREC offre le choix entre deux méthodes de mesure de teneur en eau du substrat : la réflectométrie dans le domaine temporel (RDT, à l'aide du *MP-917*) (Topp et Davis 1985; Lambany *et al.* 1996, 1997) et la gravimétrie (pesée). Peu importe la méthode utilisée, les mesures doivent se faire avec des instruments suffisamment précis et selon une approche rigoureuse (par exemple, l'utilisation de potences pour stabiliser les mesures par pesées, ou de connexions sans corrosion pour les sondes RDT). De cette façon, les instruments pourront offrir la pleine mesure de leur précision.

1.2.2 Intensité d'échantillonnage et répartition spatiale des mesures

Pour tenir compte de la variabilité spatiale des teneurs en eau du substrat générées par les asperseurs utilisés à l'extérieur, et pour obtenir des moyennes affectées d'un degré acceptable d'erreur (± 5%) et un niveau de confiance de 95%, le nombre optimal de récipients à échantillonner entre deux asperseurs consécutifs se situe entre 11 et 19 (Lamhamedi *et al.* 2006). Ces auteurs suggèrent fortement d'échantillonner entre deux asperseurs consécutifs, lorsque la pression du débit d'eau est relativement stable tout au long de la ligne d'irrigation. De plus, pour éviter les effets de la variabilité spatiale et afin que les échantillons (récipients) soient indépendants, il serait important de garder une distance minimale entre les récipients échantillons de 3,5 m.

Dans un contexte de production à grande échelle, si l'échantillonnage est insuffisant (moins de trois récipients dans une culture irriguée à l'aide de rampes mobiles ou moins de cinq, dans une culture irriguée à l'aide d'asperseurs), les données ne seront pas représentatives des cultures. Il ne sera alors pas pertinent de faire des calculs de besoin d'irrigation, car ceux-ci risqueraient d'induire le pépiniériste en erreur.

Les récipients échantillonnés doivent non seulement être représentatifs de la moyenne des teneurs en eau du substrat, mais ils doivent aussi donner un bon aperçu de l'amplitude de variation pour l'ensemble de la culture. C'est pourquoi il est essentiel de sélectionner à la fois des récipients près de la bordure et au centre de l'aire de culture. Par contre, il faudrait éviter de mesurer le premier récipient en bordure de l'aire de culture, puisque l'irrigation des cavités extérieures y est souvent gérée de façon indépendante.

D'autres aspects doivent également être pris en compte concernant l'utilisation du système *IRREC*. La manipulation des récipients sera plus fréquente si l'on choisit la mesure des teneurs en eau par pesée comme méthode de travail. Ces manipulations risquent, à la longue, de causer des pertes de silice et de modifier les caractéristiques du substrat, en accélérant son affaissement. Les teneurs en eau déduites par des pesées répétées des récipients témoins ne seront alors plus nécessairement représentatives de l'état réel du reste de la culture. Il devient donc nécessaire de changer les récipients témoins à intervalle régulier.

Le poids de la silice (ou de tout autre matériel utilisé pour recouvrir les semences en vue de favoriser la germination) a une influence significative sur le résultat de la pesée. La répartition de ce matériel peut varier beaucoup à l'intérieur d'une même culture. C'est donc un des aspects qu'il faut considérer si l'on choisit cette méthode de mesure des teneurs en eau.

1.2.3 Fréquence d'échantillonnage

La fréquence d'échantillonnage des teneurs en eau du substrat variera selon les objectifs visés par l'utilisateur. Idéalement, l'échantillonnage devrait se faire selon un rythme régulier. Pour les cultures à faible consommation d'eau (essences résineuses 1+0 produites au Québec), des mesures aux 48 heures sont généralement suffisantes. Plus le gabarit des plants (et donc, leur consommation en eau) sera important par rapport au volume de la cavité, plus la fréquence d'échantillonnage devra être élevée. Pour des cultures plus exigeantes en eau (plants 2+0), les mesures doivent être effectuées quotidiennement.

Dans le cas des cultures extérieures 2+0 en récipients, si les précipitations récentes ou anticipées sont suffisantes pour combler les besoins en eau des cultures, ou si l'assèchement anticipé est faible,

la fréquence d'échantillonnage (besoin d'échantillonner) pourra être réduite. En revanche, pour utiliser *IRREC* dans une perspective d'optimisation de l'interaction entre la fertilisation et l'irrigation (utilisation du système *FERTIRREC*, en cours de conception à la DRF), des mesures fréquentes, au moins sur une base quotidienne, seront essentielles.

1.2.4 Maîtrise des systèmes d'irrigation

Afin de fournir au personnel de terrain des pépinières des prescriptions d'irrigation fiables et faciles d'interprétation, *IRREC* utilise les paramètres de performance des systèmes d'irrigation, exprimés en millimètres à l'heure (mm/h) ou en millimètres par passage de rampe. Sans ces paramètres, *IRREC* pourra seulement calculer un besoin d'irrigation exprimé en millimètres d'eau, ce qui rendra plus difficile la concrétisation des actions destinées à combler les besoins en eau des cultures en récipients.

Afin que ces actions concrètes puissent se matérialiser de façon précise sur le terrain, *IRREC* devra aussi prendre en compte d'autres caractéristiques propres à chaque type de système d'irrigation utilisé en pépinière forestière. Chacun d'entre eux réagit d'une façon qui lui est propre aux conditions météorologiques ambiantes (température, ensoleillement, humidité relative, mais surtout la vitesse du vent) qui prévalent au moment de l'irrigation. Il est donc primordial d'établir une relation fiable entre ces paramètres pour définir précisément les performances exactes des systèmes d'irrigation (voir la section 2.1.5). Le contrôle de la pression d'eau (kPa ou psi) à l'aide de manomètres est également un élément important à surveiller lors de l'irrigation.

1.3 Schéma de fonctionnement de *IRREC*

La figure 1 schématise le fonctionnement de *IRREC* :

(a) les **mesures prises sur le terrain** font l'objet d'un calcul préliminaire dont les résultats (moyenne, minimum et maximum de chaque source; pesées [kg] et RDT [ns = 10^{-9} sec]) sont reportés dans le tableau central;

(b) les informations nécessaires aux prescriptions d'irrigation sont regroupées dans le **tableau central**. Ce tableau est le **centre de calcul de *IRREC***. Les différentes catégories de variables qui doivent être prises en compte dans le calcul des besoins d'irrigation sont consignées dans des **tableaux satellites**. Ces dernières sont ensuite relayées au tableau central, selon les informations relatives à chaque culture, afin de simplifier la prise en compte de tous les facteurs;

(c) les **caractéristiques des systèmes d'irrigation** sont reportées dans le tableau central en fonction du système d'irrigation assigné à chaque culture. Elles serviront en partie aux calculs de conversion du besoin d'irrigation en minutes ou en passages de rampe d'irrigation, lequel est exprimé à l'origine en mm ou L/m² (voir la section 2.1.5);

(d) les **caractéristiques des récipients** (masse du récipient, longueur de la sonde de *MP-917* en contact avec le substrat, etc.) sont reportées dans le tableau central (b) en fonction du récipient associé à la culture. Elles contribueront en partie aux calculs de conversion des pesées ou des nanosecondes (*MP-917*) en « %, v/v », puis en mm (L/m²), ainsi qu'à la prise en compte d'autres facteurs, notamment la rétention de l'eau d'irrigation (le non ruissellement), selon le type de parois du récipient (pleines ou ajourées) ou de l'affaissement du substrat avec le temps (voir la section 2.1.1);

(e) la **masse fraîche des plants** est fournie au tableau central (b) à la date « X ». Le tableau des masses sèches (« Biomasses ») prend en compte l'évolution de la masse sèche des plants prévue, selon les fourchettes définies pour *PLANTEC* et *Plantec 2* (masses sèches de début et de fin de saison utilisées pour le calcul des calendriers de fertilisations par ces logiciels), ainsi que le rapport « masse fraîche/masse sèche », pour chaque type de culture en fonction du genre (pin, épinette, etc.) au fil de la saison (voir les sections 1.4.2 et 2.1.2);

(f) les **caractéristiques des sondes RDT** sont reportées dans le tableau central (b) en fonction de celles assignées à chaque culture. Elles serviront à la conversion des nanosecondes (ns) en « %, v/v » (voir la section 2.1.3);

(g) le **pourcentage (%) de rétention d'eau** en fonction du type de parois du récipient (voir la section 2.1.4) est calculé dans le tableau central, selon la courbe de rétention d'eau assignée au type de parois du récipient de la culture (pleine ou ajourée). La courbe de rétention vise à prendre en compte les propriétés hydrophobes du sub-strat. Elle dépend de la teneur en eau du substrat mesurée inscrite dans le tableau central. Ce pourcentage de rétention servira à ajuster le besoin d'irrigation tout en prenant en compte le ruissellement (quantité d'eau non retenue par le substrat), afin d'obtenir le « %, v/v » souhaité dans le substrat après l'irrigation;

(h) les **prévisions météorologiques** sont intégrées à toutes les données du tableau central (b) pour calculer les besoins d'irrigation, et

(i) fournir des informations complémentaires (graphiques, avertissements, etc.).

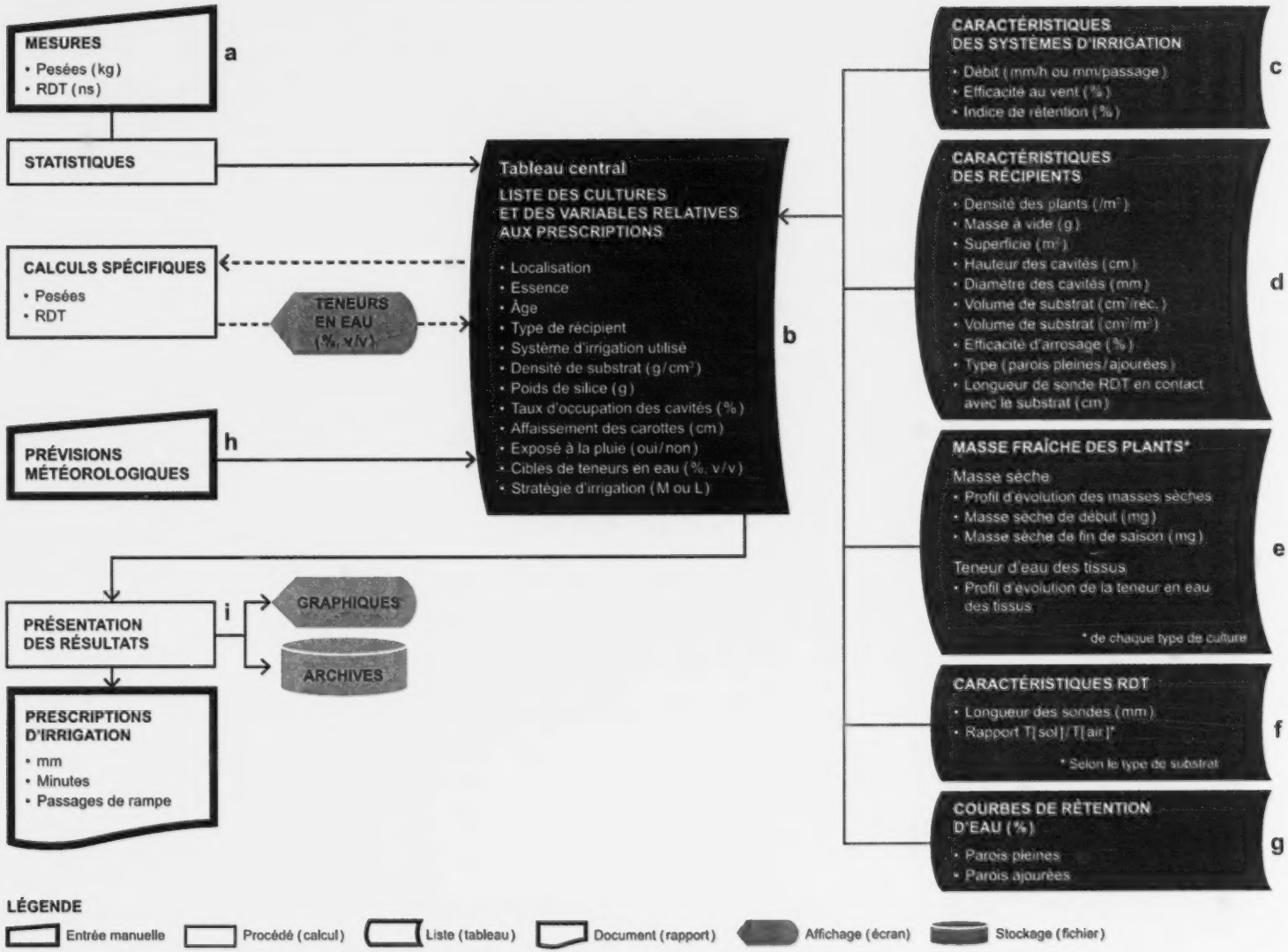


Figure 1. Le schéma de fonctionnement de *IRREC*.

La figure 1 ne présente que l principales variables utilisées par *IRREC*. D'autres variables intermédiaires sont utilisées dans les calculs. Les annexes en fournissent la liste complète et présentent les relations entre elles.

1.4 Choix de la méthode de mesure de la teneur en eau du substrat et modalités de conversion

La teneur en eau volumétrique du substrat est la variable de référence retenue pour les calculs reliés à la mesure des besoins en eau des plants. Elle se définit comme la proportion du volume occupé par l'eau, par rapport à celui du substrat (cm^3 H_2O/cm^3 substrat), et s'exprime en « %, v/v ». La teneur en eau volumétrique du substrat permet de calculer directement les volumes d'eau qu'il faut appliquer lors de l'irrigation des cultures en récipients.

Les deux principales méthodes utilisées pour mesurer la teneur en eau volumétrique du substrat sont la RDT (réflectométrie dans le domaine temporel) et la gravimétrie (pesée des récipients) (voir section 1.2.1). Chacune d'entre elles comporte des avantages et des inconvénients, décrits ci-après.

La méthode de la RDT est bien maîtrisée avec le type de substrat de tourbe-vermiculite (3 :1, v/v) généralement utilisé au Québec et ce, grâce à des études rigoureuses initiées au cours de la décennie 1990 par Lambany *et al.* (1996, 1997). La RDT mesure directement la teneur en eau volumétrique, en échantillonnant plusieurs cavités (en moyenne 5 cavités par sonde). Son avantage principal est que la mesure de teneur en eau ne dépend que du substrat, peu importe le gabarit des plants. Cette méthode fournit donc des mesures relativement stables et diminue légèrement les effets d'hétérogénéité du substrat et de différences de croissance entre les plants (surface foliaire évaporatoire en relation avec le dessèchement du substrat). Toutefois, l'appareil de mesure *MP-917* préconisé pour la RDT est relativement coûteux, et les sondes nécessaires à son utilisation sont souvent en nombre limité dans chaque pépinière. Le temps exigé pour la prise de mesure constitue aussi un inconvénient à l'utilisation de cette méthode avec le système *IRREC*. Par ailleurs, certains pépiniéristes du Québec utilisent un substrat de culture à base de tourbe-vermiculite mais additionné d'une proportion élevée de perlite, ce qui pourrait fausser les lectures des sondes RDT. En effet, le mode d'utilisation du *MP-917* est moins connu dans de telles conditions.

La méthode par gravimétrie (pesée), quant à elle, offre l'avantage d'utiliser des appareils peu coûteux et permet l'échantillonnage d'un plus grand nombre de cavités que la RDT. Toutefois, la conversion des masses en teneur en eau doit tenir compte de la masse fraîche des plants, ainsi que celle de la silice qui les recouvre. Pendant la première année de culture en récipients (stade 1+0), la méthode par pesée devrait être privilégiée, car elle offre une bonne précision de mesure de la teneur en eau du substrat. La masse fraîche des plants est alors généralement négligeable comparée à celle du substrat, de la silice et du récipient lui-même. Cependant, elle augmente de façon exponentielle durant la deuxième saison de croissance (plants 2+0) des plants en récipients. La RDT est alors une méthode plus sûre avec le substrat de tourbe-vermiculite (3 :1, v/v) utilisé au Québec. La mesure par pesée (gravimétrie) demeure valable au stade 2+0, à condition de connaître ou d'estimer précisément l'évolution saisonnière de la masse fraîche des plants. Par ailleurs, la variabilité spatiale de la masse de silice sur les récipients peut nuire à la précision de la méthode par gravimétrie. Par contre, des mesures moins précises mais plus nombreuses (par exemple, 3 ou 4 fois plus de mesures qu'avec des sondes RDT), peuvent compenser une moindre précision de chaque mesure.

La mesure de la tension du substrat à l'aide de tensiomètres Hortau (Bettez et Gadbois, 2007) pourrait être vue comme une troisième méthode prometteuse. Tout comme la RDT avec le *MP-917* (Lambany *et al.* 1997), ces appareils fournissent des mesures rigoureuses et précises. Cependant, leur nombre doit être suffisant pour être représentatif de l'état général de chaque culture. Comme un tensiomètre ne peut être installé que dans une seule cavité du récipient, il n'échantillonne qu'un volume très limité de substrat. Cet appareil est également très sensible aux perturbations localisées. Par ailleurs, le tensiomètre mesure uniquement le potentiel matriciel et non celui engendré par le soluté (potentiel osmotique). Si le substrat se dessèche, il perd le contact avec la sonde, de sorte que le tensiomètre peut devenir non fonctionnel (Rundel et Jarell 1991). Afin d'estimer correctement la quantité d'eau à ajouter lors des irrigations, il est essentiel de connaître les courbes de rétention d'eau reliant le potentiel matriciel (mesuré par le tensiomètre) et la teneur en eau volumétrique. Pour l'instant, les mesures effectuées à l'aide de tensiomètres n'ont pas fait l'objet d'études suffisantes pour être utilisées avec *IRREC*.

1.4.1 Conversion des mesures par RDT en « %, v/v »

Le *MP-917* (Figure 2) utilise le principe de la RDT en mesurant le temps de déplacement d'une onde électromagnétique (OEM), exprimé en nanosecondes (ns = 10^{-9} sec). Cette mesure de base est ensuite convertie en teneur en eau volumétrique (%, v/v) selon les caractéristiques du substrat, de la sonde et du récipient utilisés.

Pour connaître la teneur en eau volumétrique du substrat à partir des mesures par RDT exprimées en nanosecondes, deux catégories d'informations sont essentielles : celles liées à la sonde, et celles liées au substrat.

La longueur totale de la sonde du *MP-917*, ainsi que sa longueur de contact avec le substrat, sont prises en compte dans les calculs. Cette longueur dépend uniquement du type de récipient et de la position verticale de la sonde, en fonction du défilement des cavités (voir la section 2.1.3).

Le rapport entre le temps de propagation de l'onde électromagnétique (OEM) dans l'air et celui dans un substrat sec (rapport : Ts/Tair) dépend du type de substrat utilisé. Dans le cas des substrats tourbeux comme ceux utilisés au Québec, cette valeur se situe autour de 1,03 (Lambany *et al.* 1996, 1997). Pour d'autres types de substrats, il faudra alors réévaluer le rapport Ts/Tair.

La teneur en eau volumétrique du substrat (θv) est calculée à l'aide de la relation suivante (valable pour les substrats, les sondes et la configuration de *MP-917* utilisés dans les pépinières forestières du Québec) :

$$\theta v = 12{,}56 \times \left[\frac{n\,\text{sec} - \left(\frac{2 \times (LS - LSs)}{VL} \right)}{\left(\frac{2 \times LSs}{VL} \right)} - TsTair \right]$$

où

θv = teneur en eau volumétrique du substrat (%, v/v)

n sec = lecture du *MP-917* en nanosecondes (ns)

12,56 = facteur lié à la constante diélectrique de l'eau et au paramétrage du *MP-917*

LS = longueur totale de la sonde (mm)

LSs = longueur de sonde en contact avec le substrat (mm)

$TsTair$ = rapport « temps de propagation de l'OEM dans le sol/temps de propagation de l'OEM dans l'air »

VL = vitesse de la lumière (299,704 mm/ns).

Figure 2. Appareil portatif (*MP-917*) de mesure de la teneur en eau volumétrique du substrat (%, v/v) par réflectométrie dans le domaine temporel (RDT). La mesure obtenue ne dépend de rien d'autre que de la teneur en eau du substrat. (Photo : M. Renaud).

1.4.2 Conversion des mesures par pesée en « %, v/v »

Des pesons numériques, relativement précis (± 20 g) et peu coûteux, peuvent être utilisés pour les mesures par pesée (Figure 3). Cependant, il s'avère essentiel de vérifier les valeurs affichées, car certains modèles peuvent avoir un biais important. Une régression linéaire simple, de la forme « $y = a + bx$ » peut être intégrée dans *IRREC* afin de corriger ce biais (voir la section 4.4).

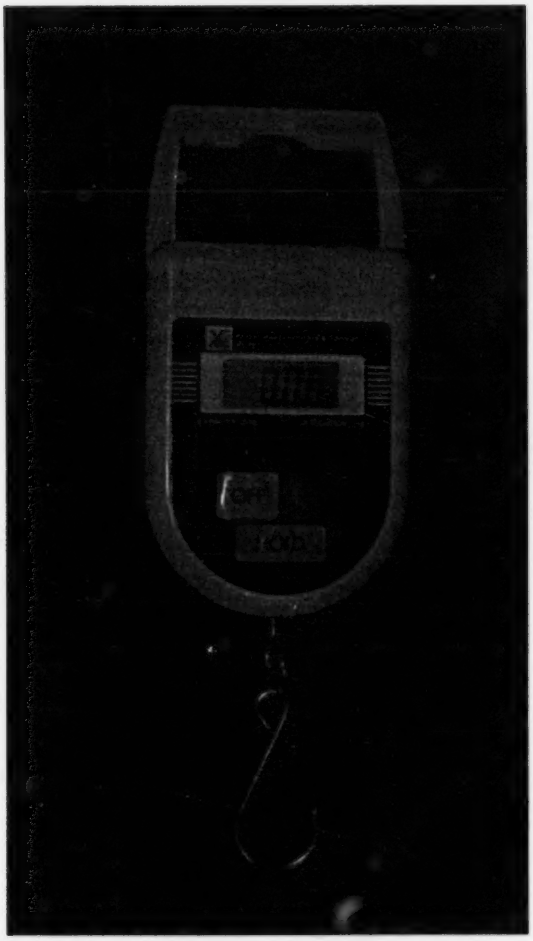


Figure 3. Exemple de peson numérique pouvant servir à mesurer la teneur en eau du substrat par gravimétrie dans les productions à grande échelle. La mesure obtenue implique de pouvoir estimer la masse fraîche des plants au moment de la pesée et aussi, de connaître les masses des composantes autres que l'eau (récipient, tourbe sèche, silice, etc.). (Photo : D. Girard).

L'utilisation des mesures par pesée par *IRREC* est basée sur l'équation suivante (GINGRAS *et al.* 1999) :

$$PT = (P + S + SU) + V \times \theta v / 100$$

où

PT = masse totale du récipient (g)

P = masse du récipient (g)

S = masse de la silice (g)

SU = masse du substrat sec (g)

V = volume total du récipient (cm^3)

θv = teneur en eau volumétrique du substrat (%, v/v).

Exprimée par convention de la façon suivante :

$$PT = (V \times \frac{\theta v}{100}) + (P + S + SU)$$

Afin d'obtenir la teneur en eau volumétrique du substrat à partir de la pesée au lieu du poids à partir de la teneur en eau, il faut plutôt faire le calcul suivant :

$$\theta v = 100 \times (\frac{PT - (P + S + SU)}{V})$$

L'équation, sous cette forme, ne peut cependant être utilisée que pour les cultures 1+0, en raison de la très faible masse fraîche des plants des essences résineuses produites au Québec (voir la section 1.4). Au stade 2+0, la masse fraîche des plants d'un récipient devenant significative, il faut intégrer cette variable de la manière suivante :

$$\theta v = 100 \times (\frac{PT - (P + S + SU + PF)}{V})$$

où :

θv = teneur en eau volumétrique du substrat (%, v/v)

PT = masse totale du récipient (g)

P = masse du récipient (g)

S = masse de la silice (g)

SU = masse du substrat sec (g)

PF = masse fraîche totale de tous les plants du récipient (g).

La masse fraîche des plants change continuellement au cours de la saison de croissance. Cette variable doit donc être régulièrement estimée en fonction de la date des pesées. La solution retenue est d'utiliser un profil commun de l'évolution saisonnière de la masse sèche des plants, combiné à un profil d'évolution du rapport « masse fraîche / masse sèche » propre à chaque genre.

1.4.2.1 Évolution saisonnière de la masse sèche des plants

Au Québec, nous disposons d'une banque importante de données morphologiques acquises au cours des 30 dernières années, provenant à la fois des suivis de productions réalisés par les pépiniéristes, et de dispositifs expérimentaux mis en place dans les pépinières gouvernementales de la province. Cette banque fournit, entre autres, l'évolution saisonnière de la masse sèche des plants produits dans nos pépinières.

L'analyse des données de la masse sèche des plants permet d'énoncer les faits suivants.

Le profil d'évolution saisonnière de la masse sèche des plants 2+0 en récipients varie très peu d'une essence ou d'un type de récipient à l'autre (Figure 4). Ce profil est donné par l'équation suivante (de type « normale cumulée ») :

$$y = \frac{m}{1 + e^{-ax+b}} + k$$

où

y = % de l'accroissement en masse sèche

x = % de la saison de croissance

et

m = amplitude en ordonnée (y)

k = niveau en ordonnée (y)

a = pente

b = pente (début-fin ou positionnement en abscisse « x » du point d'inflexion).

Cette équation est généralement reconnue comme le standard de l'évolution saisonnière de la masse sèche des plants. Elle est suffisamment fiable pour les calculs dans la plupart des contextes de production de plants forestiers en pépinière. En combinant ce profil d'évolution à un objectif de masse sèche propre à chaque type de culture, *IRREC* fournit une prévision de masse sèche des plants, pour n'importe quelle date de la saison de croissance (voir aussi la section 2.1.2).

Cependant, la masse sèche prévue en fin de saison de croissance risque de varier selon les conditions environnementales rencontrées sur le terrain (ex. : ensoleillement, température, humidité, précipitations, degrés-jours, etc.) et évidemment, inconnues en début de saison. La masse sèche prévue en fin de saison est donc un paramètre à surveiller et à ajuster au besoin en cours de saison, afin de maintenir la fiabilité de l'évaluation des teneurs en eau du substrat par gravimétrie (pesée).

Afin d'être utilisable sous toutes les latitudes, *IRREC* offre la possibilité de définir les dates de début et de fin de saison (voir la section 2.1.2).

1.4.2.2 Évolution saisonnière de la teneur en eau des tissus

Bien que la littérature fasse peu mention de cet aspect et que les données dont nous disposons actuellement soient en nombre limité, on suppose que le comportement du rapport « masse fraîche / masse sèche » des plants diffère d'un genre à l'autre, selon la phénologie propre à chacun (ex. : *Picea* comparé à *Pinus*) (Figure 5). *IRREC* permet donc de choisir entre cinq courbes différentes d'évolution saisonnière du rapport « masse fraîche / masse sèche » des plants, selon le genre *Picea*, *Pinus*, *Larix*, *Abies* et autres. Ces courbes sont combinées à celles de prévision de masse sèche afin d'estimer la masse fraîche des plants à chaque stade de croissance (voir aussi la section 2.1.2).

Le profil saisonnier des courbes de teneur en eau des tissus devra être précisé à l'aide de suivis, et leur importance devra être pondérée par l'analyse de l'influence réelle du rapport « masse fraîche / masse sèche » sur le calcul de la teneur en eau obtenu à partir de pesées. D'ici à ce que les pépiniéristes obtiennent des informations plus précises, un rapport « masse fraîche / masse sèche » général d'environ 4 semble, pour l'instant, donner des résultats acceptables pour les essences produites au Québec, dans un contexte de production utilisant des systèmes d'irrigation qui induisent une variabilité spatiale importante. Cependant, si les masses fraîches des plants sont élevées par rapport à celle des récipients (conditions extrêmes), des simulations effectuées avec *IRREC* laissent présager que les rapports « masse fraîche / masse sèche » des plants pourraient avoir une influence significative sur l'évaluation des teneurs en eau du substrat. Il est donc essentiel que des suivis du rapport « masse fraîche / masse sèche » soient effectués tout au long de la saison de croissance, afin de mieux préciser l'évolution saisonnière de ce rapport.

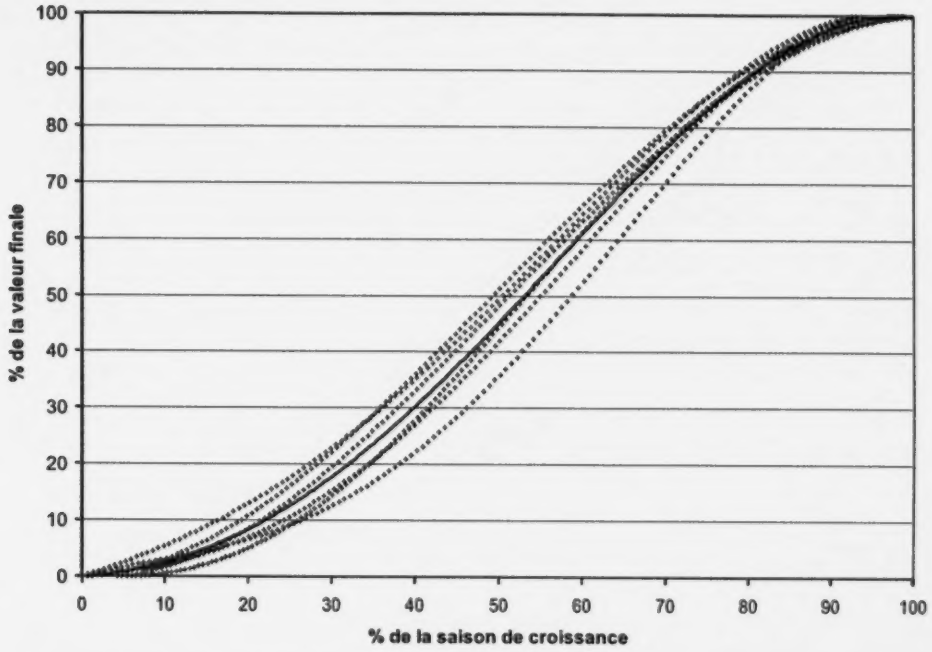


Figure 4. Profils d'évolution saisonnière des masses sèches des cultures 2+0 en récipients, toutes essences et récipients confondus (standards de *PLANTEC*, obtenus à partir de plus de 1000 points observés au cours d'une dizaine de saisons de croissance, tous types de cultures confondus). Un seul profil saisonnier (trait) a été retenu afin de représenter les cultures 2+0.

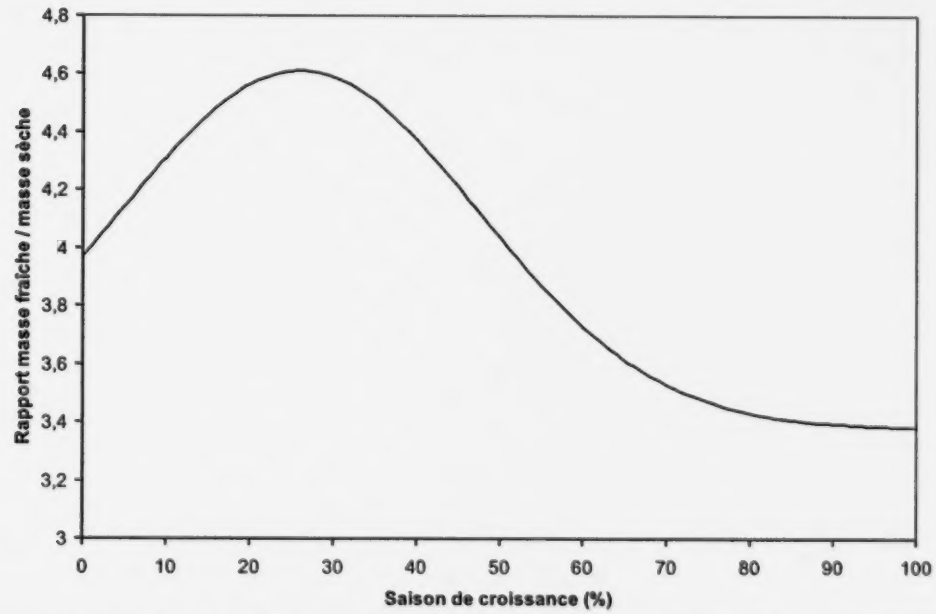


Figure 5. Exemple d'une courbe d'évolution du rapport «masse fraîche/masse sèche» des plants (2+0) pendant la saison de croissance.

Pour l'instant, le profil de courbe retenu pour exprimer l'évolution saisonnière du rapport « masse fraîche/masse sèche » des plants (Figure 5) est exprimé par l'équation (de type « distribution normale ») suivante :

$$y = \left[\left(\frac{a}{k\sqrt{2\pi}} \right) e^{\frac{((x-m)/k)^2}{2}} \right] + b$$

où

y = rapport masse fraîche/masse sèche des plants

x = % de la saison de croissance

m = position du sommet en abscisse (x)

k = amplitude en ordonnée (y)

a = sommet (niveau en ordonnée; y)

b = niveau de base en ordonnée (y).

La masse fraîche des plants d'un récipient est estimée d'après l'équation suivante :

$PFx = NC \times PSx \times RFSx$

où

PFx = masse fraîche d'un plant à la date x

NC = nombre de cavités du récipient

PSx = masse sèche d'un plant à la date x

$RFSx$ = rapport masse fraîche/masse sèche des plants à la date x.

1.5 Calcul des besoins d'irrigation

Tant que la teneur en eau mesurée dans le substrat d'une culture reste au-dessus du seuil minimum fixé, il n'est pas nécessaire d'irriguer. Par contre, si elle descend sous cette valeur, une irrigation est proposée pour atteindre une teneur en eau ciblée. Le besoin brut d'irrigation de la culture (AR, augmentation nécessaire de la teneur en eau du substrat, en %, v/v) est calculé en faisant la différence entre la cible (TC) et la teneur en eau mesurée (TM), comme suit :

$AR = TC - TM$

où :

AR = augmentation nécessaire (besoin brut; %, v/v)

TC = teneur en eau ciblée (point de consigne supérieur; %, v/v)

TM = teneur en eau mesurée (%, v/v).

Le besoin d'irrigation de base doit ensuite être corrigé en fonction de différents facteurs (détaillés dans les sections 1.5.1 à 1.5.5), puis transformé en une unité facile à interpréter par le personnel chargé d'exécuter l'irrigation (temps d'irrigation ou nombre de passages de la rampe).

1.5.1 Correction et conversion selon le type de récipient

Puisque chaque type de récipient présente des caractéristiques qui lui sont propres, en termes de volume de substrat (L), de superficie (m^2) et d'efficacité (%) de captage d'eau (en fonction de sa géométrie et selon les taux d'efficacité utilisés dans *PLANTEC* et *Plantec 2*), la teneur en eau du substrat augmentera différemment d'un type de récipient à l'autre et ce, pour une même quantité d'eau appliquée (L/m^2 ou mm). Le besoin d'irrigation de base d'une culture donnée (MM, exprimé en litre par mètre carré ou millimètre d'eau), est donc calculé comme suit :

$$MM = \frac{AR \times VR}{ECR \times SR}$$

où :

MM = irrigation de base nécessaire pour le type de récipient (mm ou L/m^2)

AR = augmentation nécessaire (besoin brut; %, v/v)

VR = volume de substrat dans le récipient (L)

ECR = efficacité de captage d'eau du récipient (%)

SR = superficie du récipient (m^2).

Ce besoin de base nécessite toutefois d'autres ajustements, détaillés dans les sections suivantes.

1.5.2 Correction relative aux propriétés hydrophobes de la tourbe sèche

Une fois converti en mm d'eau (ou L/m^2), le besoin d'irrigation de base doit être corrigé en fonction des pertes d'eau par ruissellement causées par les propriétés hydrophobes de la tourbe sèche, utilisée couramment au Québec comme substrat. En effet, plus la teneur en eau initiale du substrat (%, v/v) est faible, plus la rétention de l'eau d'irrigation par le substrat est faible (voir aussi la section 2.1.4). La capacité de rétention d'eau du substrat d'une culture peut aussi varier en fonction du type de récipient utilisé (à parois pleines ou ajourées).

Un facteur relié à ces pertes d'eau doit donc être estimé, puis pris en compte en fonction de ces deux variables. Ce facteur est toutefois peu influent pour les substrats de tourbe-vermiculite utilisés au Québec, si les teneurs en eau initiales sont supérieures à 20 % (v/v). La manière d'établir ce facteur est discutée à la section 2.1.4. Ce facteur relié aux pertes par ruissellement est intégré au calcul du besoin d'irrigation comme suit :

$$MMc1 = \frac{MM}{FCR}$$

où :

$MMc1$ = irrigation corrigée en fonction des pertes d'eau (mm ou L/m²)

MM = irrigation de base pour le type de récipient (mm ou L/m²)

FCR = taux de rétention d'eau en fonction de la teneur en eau initiale du substrat (%, v/v) et du type de récipient (parois pleines ou ajourées : %).

1.5.3 Correction relative au débit du système d'irrigation

L'efficacité d'un système d'irrigation utilisé en pépinière est liée à son débit. À teneur en eau égale dans le substrat, plus le débit du système d'irrigation est important, plus les pertes d'eau par ruissellement risquent d'être élevées. Chaque système d'irrigation a donc sa propre efficacité intrinsèque (voir la section 2.1.5). Il est préférable que les calculs tiennent compte de ces pertes de la façon suivante :

$$MMc2 = \frac{MMc1}{FCD}$$

où :

$MMc2$ = irrigation corrigée (type de récipient + ruissellement + débit) (mm ou L/m²)

$MMc1$ = irrigation corrigée (en fonction des pertes d'eau) (mm ou L/m²)

FCD = facteur de correction intrinsèque, lié au débit du système d'irrigation.

1.5.4 Correction relative aux facteurs météorologiques prévalant lors de l'irrigation

Toutes les variables précédentes sont définies pour des conditions environnementales optimales. Un facteur de correction doit toutefois être appliqué pour tenir compte des conditions météorologiques du moment, afin que la prescription d'irrigation soit la plus adéquate possible. Le vent est le facteur environnemental qui influence le plus l'efficacité de l'irrigation à cause des embruns qu'il crée (pertes par dérive). L'ensoleillement et la température ont une influence limitée, alors que celle de l'humidité relative est négligeable.

Le tableau 1 présente une table de référence permettant de tenir compte de ces facteurs météorologiques, pour les systèmes d'irrigation utilisés au Québec. Cette table permet de calculer un facteur de correction pour l'ensemble des conditions météorologiques (FCM). Les valeurs de ce tableau sont des estimations basées sur notre expérience en production de plants forestiers. Pour l'instant,

Température	
Niveau	Facteur
20 et -	1,000
20 et -	1,000
20 et -	1,000
20-25	0,990
25-30	0,985
30 et +	0,975

Vent	
Niveau	Facteur
nul	1,000
faible	0,960
modéré	0,900
fort	0,800

Ensoleillement	
Niveau	Facteur
ensolleilé	0,980
variable	0,990
nuageux	1,000

Humidité	
Niveau	Facteur
sec	0,990
confortable	0,997
humide	1,000

Tableau 1. Facteurs de correction reliés aux conditions météorologiques. Un niveau est sélectionné pour chacun de ces paramètres. À chaque niveau d'un paramètre correspond un facteur. Le produit de ces facteurs donne le facteur global qui permet d'estimer les pertes d'eau lors de l'irrigation

dans un contexte de production à grande échelle, ces valeurs semblent adéquates. Il n'est cependant pas à exclure que des mesures soient effectuées en conditions contrôlées, afin de préciser les valeurs à utiliser pour les facteurs les plus influents (surtout le vent).

Chaque type de système d'irrigation est influencé différemment par les conditions météorologiques qui prévalent lors de l'irrigation. Par exemple, une rampe d'arrosage est moins influencée par le vent que des asperseurs fixes (voir la section 2.1.5). Un facteur de correction propre à chaque système d'irrigation doit donc être appliqué au facteur de correction global, en fonction des conditions météorologiques (principalement le vent; *CIV*) :

$$MMc3 = \frac{MMc2}{FCM \times CIV}$$

où :

MMc3= irrigation totale nécessaire (mm ou L/m²)

MMc2= irrigation corrigée (type de récipient + ruissellement + débit) (mm ou L/m²)

FCM = correction relative aux conditions météorologiques lors de l'irrigation (%)

CIV = facteur d'efficacité au vent du système d'irrigation (%).

1.5.5 Correction en fonction des précipitations anticipées

Les précipitations anticipées à court terme (exprimées en mm ou L/m²) doivent être retranchées du besoin net d'irrigation des cultures exposées à la pluie (en l'occurrence, celles produites hors des tunnels ou des serres). L'irrigation anticipée par la pluie (*IRMet*) s'obtient en multipliant la quantité de pluie annoncée (*PREV*, en mm) par la probabilité de précipitations (*PROB*, en %), telles que fournies par les services de prévisions météorologiques :

$$IRMet = PREV \times PROB$$

où :

IRMet = irrigation anticipée par la pluie (mm ou L/m²)

PREV = quantité de pluie prévue (mm)

PROB = probabilité de précipitations (%).

Avant de retrancher cette irrigation anticipée du besoin total d'irrigation calculé, il faut intégrer l'efficacité de captage du récipient aux calculs :

$$MMcN = MMc3 - (IRMet \times ECR)$$

où :

MMcN = irrigation nette nécessaire (mm ou L/m²)

MMc3 = irrigation totale nécessaire (mm ou L/m²)

IRMet = irrigation anticipée par la pluie (mm ou L/m²)

ECR = efficacité de captage du récipient (%) (voir la section 1.5.1).

La pluie est le seul facteur météorologique pris en compte par *IRREC*, car l'influence des autres facteurs météorologiques (vent, température, ensoleillement, etc.) anticipés au moment des précipitations est plus complexe à prévoir.

Généralement, la pluie offre une uniformité et une efficacité d'irrigation optimales pour réhydrater les substrats tourbeux, sauf lors de très fortes averses. Si la pluie est anticipée (réduisant ainsi le besoin en irrigation), la teneur en eau au moment de l'irrigation sera inconnue, puisque la culture aura probablement déjà été irriguée. C'est pourquoi, dans ces conditions, il est recommandé de ne pas appliquer le facteur de correction en fonction des teneurs en eau initiales du substrat (variable *FCR*; voir la section 1.5.2). Des mesures régulières de teneurs en eau du substrat devraient atténuer cette lacune (de nature temporelle) du système *IRREC*.

Le seuil inférieur de teneur en eau du substrat fixé par le pépiniériste (voir le début de la section 1.5) doit comporter une marge de sécurité afin de pallier l'incertitude des prévisions de précipitations. Compte tenu du climat humide qui prévaut au Québec, une marge d'environ 5 %, v/v au-dessus du seuil critique de teneur en eau (pour chaque moment de la saison) est recommandée. Par exemple, si la teneur en eau critique dans le substrat, associée à un risque important de pertes de plants, est évaluée à 10 %, v/v, le seuil inférieur devrait être fixé à 15 %, v/v. Lors de journées propices à l'évapotranspiration, la consommation quotidienne d'eau d'un plant 2+0 peut atteindre 10%, v/v de la teneur en eau du substrat. Ainsi, si l'irrigation a été annulée à cause de précipitations attendues mais que celles-ci ne sont pas survenues, la situation pourra être corrigée le lendemain sans risquer de perdre des plants.

1.5.6 Synthèse du calcul des besoins d'irrigation des cultures en récipients

En résumé, tous les facteurs de correction spécifiques (de *MM* à *MMcN*) sont appliqués au débit de chaque système d'irrigation (*DSIR*; à la sortie des jets ou des gicleurs) et aux précipitations anticipées, afin de convertir le besoin brut d'irrigation de la culture (*AR*; augmentation de teneur en eau nécessaire en %, v/v) en minutes (min.) d'irrigation ou passages de rampe, selon le système d'irrigation.

Globalement, les besoins d'irrigation de la culture en récipients sont donc calculés comme suit :

$$PRES = \frac{\frac{VR \times (TC - TM)}{SR} - (IRMet \times ECR)}{(ECR \times FCR \times FCD \times FCM \times CIV) \times DSIR}$$

où :

PRES = prescription d'irrigation (minutes ou passage(s) de rampe)

VR = volume de substrat dans le récipient (cm^3)

TC = teneur en eau ciblée (%, v/v)

TM = teneur en eau mesurée (%, v/v)

SR = superficie du récipient (m^2)

IRMet = irrigation anticipée par la pluie (mm ou L/m^2)

ECR = efficacité de captage du récipient (%)

FCR = taux de rétention en fonction de la teneur en eau initiale du substrat (%, v/v) et du type de récipient (parois pleines ou ajourées : %)

FCD = facteur de correction lié au débit (%)

FCM = correction relative aux conditions météorologiques lors de l'irrigation (%)

CIV = facteur d'efficacité au vent du système d'irrigation (%)

DSIR = débit du système d'irrigation (en mm/h ou mm/passage de rampe).

Chapitre deux

Les entrées

Les entrées nécessaires au fonctionnement de *IRREC* sont classées en deux catégories principales :

- les données à caractère permanent, reliées aux spécificités et aux caractéristiques des équipements (récipients, systèmes d'irrigation, etc.) et les intrants (fertilisants, substrats, etc.);
- les entrées quotidiennes, comme les mesures de terrain.

2.1 Données à caractère permanent

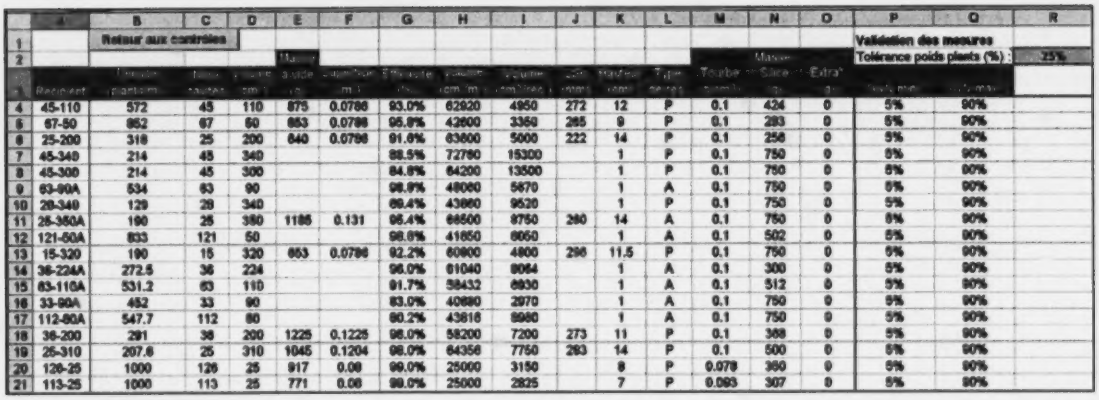
Par rapport au schéma de fonctionnement de *IRREC* (Figure 1), les informations contenues dans les tableaux satellites (Figure 1c à g) ont un caractère permanent. Plusieurs variables nécessaires aux calculs des besoins d'irrigation se répètent d'une année à l'autre. Certaines sont immuables (ex. : caractéristiques des récipients), mais d'autres peuvent nécessiter des mises à jour sporadiques (débits des systèmes d'irrigation, affaissement du substrat, etc.).

2.1.1 Caractéristiques des récipients

Peu importe la méthode employée pour mesurer la teneur en eau du substrat (pesée ou RDT), *IRREC* a besoin des caractéristiques de chaque modèle de récipient utilisé dans la pépinière. Une fois établie, les variables associées à un récipient n'exigent généralement plus de modifications. Le tableau des caractéristiques des récipients n'aura à être modifié que si un nouveau modèle de récipient est introduit ou que les variables par défaut reliées à l'empotage sont changées (densité du substrat tourbeux ou poids de la silice).

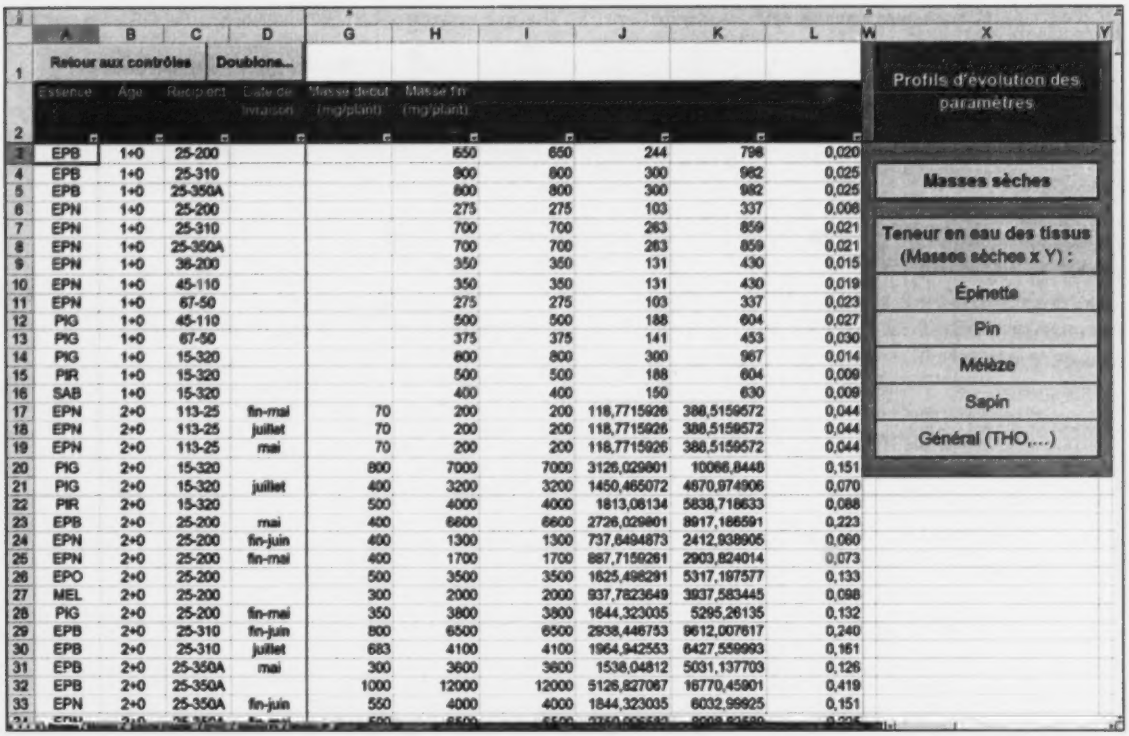
Le tableau satellite des caractéristiques des récipients (Figure 6) fournit la description complète des récipients. Il comprend les colonnes suivantes :

- Récipient : identification du récipient;
- Densité : nombre de plants par mètre carré (plants/m²);
- Nbre cavités : nombre de cavités par récipient (correspondant à *Nc* dans les formules ci-dessous);
- Volume : volume de chaque cavité, en cm³ (*Vc* dans les formules);
- Masse à vide : masse du récipient vide, en g (*MVrec* dans les formules);
- Superficie : superficie du récipient, en m² (*SR* dans la section 1.5.6 et dans les autres formules);
- Efficacité : taux d'efficacité d'arrosage, pour les pertes d'eau par ruissellement reliées à la géométrie du récipient (surface du récipient, espace entre les cavités) (*ECR* dans la section 1.5.6 et dans les autres formules);
- Volume (cm³/m²) : volume de substrat (**valeur calculée**);
- Volume (cm³/réc) : volume de substrat (**valeur calculée**);
- LSs : longueur totale (en mm) de la sonde RDT en contact avec le substrat (*LSs* dans la section 1.4.1 et dans les autres formules);
- Hauteur : hauteur (en cm) de la cavité du récipient, pour compenser l'affaissement du substrat (*Hcav* dans les formules ainsi que la section 2.2.1 ci-après);
- Type de réc. : type de récipient utilisé : à parois ajourées (A) ou pleines (P) (*FCR* dans les formules des sections 1.5.2 et 2.1.4);
- Tourbe : densité normale de la tourbe, en g/cm³ (*Dsub* dans les formules);
- Masse silice : masse de la silice, en g (*Msilice* dans les formules);
- Extra : masse des accessoires, en g, comme les broches utilisées pour faciliter la pesée (*Macc* dans les formules);
- %v/v min : teneur en eau volumétrique minimale (%, v/v) qu'il est logiquement possible d'obtenir dans le substrat, pour permettre de valider les observations de terrain;
- %v/v max : teneur en eau volumétrique maximale (%, v/v) qu'il est logiquement possible d'obtenir dans le substrat, pour permettre de valider les observations de terrain.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1		Retour aux contrôles														Validation des mesures		
2					Masse								Masse			Tolérance poids plants (%) :		25%
3	Récipient	Densité plants/m²	Taux couvert	Largeur cm	Volume cavité cc	Volume m	Efficacité %	Densité cm/m²	Volume cm³/cavité	Cavités rangée	Cavités range	Type cavité	Tourbe kg	Sable kg	Extra kg	Poids min	Poids max	
4	45-110	572	45	110	875	0.0788	93.0%	62920	4950	272	12	P	0.1	424	0	5%	90%	
5	67-50	952	67	50	853	0.0788	95.8%	42600	3360	285	9	P	0.1	283	0	5%	90%	
6	25-200	318	25	200	840	0.0788	91.6%	63600	5000	222	14	P	0.1	256	0	5%	90%	
7	45-340	214	45	340			88.5%	72780	15300		1	P	0.1	750	0	5%	90%	
8	45-300	214	45	300			84.8%	64200	13500		1	P	0.1	750	0	5%	90%	
9	63-90A	534	63	90			98.9%	48060	5670		1	A	0.1	750	0	5%	90%	
10	28-340	129	28	340			69.4%	43860	9520		1	P	0.1	750	0	5%	90%	
11	25-350A	190	25	350	1185	0.131	95.4%	66500	9750	280	14	A	0.1	750	0	5%	90%	
12	121-60A	833	121	50			98.6%	41650	8050		1	A	0.1	502	0	5%	90%	
13	15-320	190	15	320	853	0.0788	92.2%	60800	4800	296	11.5	P	0.1	750	0	5%	90%	
14	36-224A	272.5	36	224			96.0%	61040	8064		1	A	0.1	300	0	5%	90%	
15	63-110A	531.2	63	110			91.7%	58432	6930		1	A	0.1	512	0	5%	90%	
16	33-90A	452	33	90			83.0%	40680	2970		1	A	0.1	750	0	5%	90%	
17	112-80A	547.7	112	80			90.2%	43816	8960		1	A	0.1	750	0	5%	90%	
18	36-200	291	36	200	1225	0.1225	98.0%	58200	7200	273	11	P	0.1	368	0	5%	90%	
19	25-310	207.6	25	310	1045	0.1204	98.0%	64356	7750	283	14	P	0.1	500	0	5%	90%	
20	128-25	1000	128	25	917	0.09	99.0%	25000	3150		9	P	0.079	360	0	5%	90%	
21	113-25	1000	113	25	771	0.09	99.0%	25000	2825		7	P	0.063	307	0	5%	90%	

Figure 6. Tableau satellite des caractéristiques des récipients, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1d). Les valeurs des colonnes avec un en-tête vert sont des informations à fournir. Celles avec un en-tête rouge sont des calculs.



	A	B	C	D	G	H	I	J	K	L	W	X	Y
1	Retour aux contrôles			Doublons...									
2	Essence	Âge	Récipient	Date de livraison	Masse début (mg/plant)	Masse fin (mg/plant)						Profils d'évolution des paramètres	
3	EPB	1+0	25-200			650	650	244	798	0,020			
4	EPB	1+0	25-310			800	800	300	982	0,025		Masses sèches	
5	EPB	1+0	25-350A			800	800	300	982	0,025			
6	EPN	1+0	25-200			275	275	103	337	0,006		Teneur en eau des tissus (Masses sèches x Y) :	
7	EPN	1+0	25-310			700	700	263	859	0,021			
8	EPN	1+0	25-350A			700	700	263	859	0,021		Épinette	
9	EPN	1+0	36-200			350	350	131	430	0,015			
10	EPN	1+0	45-110			350	350	131	430	0,019		Pin	
11	EPN	1+0	67-50			275	275	103	337	0,023			
12	PIG	1+0	45-110			500	500	188	604	0,027		Mélèze	
13	PIG	1+0	67-50			375	375	141	453	0,030			
14	PIG	1+0	15-320			800	800	300	967	0,014		Sapin	
15	PIR	1+0	15-320			500	500	188	604	0,009			
16	SAB	1+0	15-320			400	400	150	630	0,009		Général (THO,...)	
17	EPN	2+0	113-25	fin-mai	70	200	200	118,7715926	388,5159572	0,044			
18	EPN	2+0	113-25	juillet	70	200	200	118,7715926	388,5159572	0,044			
19	EPN	2+0	113-25	mai	70	200	200	118,7715926	388,5159572	0,044			
20	PIG	2+0	15-320		800	7000	7000	3126,029801	10066,8448	0,151			
21	PIG	2+0	15-320	juillet	400	3200	3200	1450,465072	4670,974906	0,070			
22	PIR	2+0	15-320		500	4000	4000	1813,08134	5838,718633	0,088			
23	EPB	2+0	25-200	mai	400	6600	6600	2726,029801	8917,186591	0,223			
24	EPN	2+0	25-200	fin-juin	400	1300	1300	737,6494873	2412,938905	0,060			
25	EPN	2+0	25-200	fin-mai	400	1700	1700	887,7159261	2903,824014	0,073			
26	EPO	2+0	25-200		500	3500	3500	1625,498291	5317,197577	0,133			
27	MEL	2+0	25-200		300	2000	2000	937,7823649	3937,583445	0,098			
28	PIG	2+0	25-200	fin-mai	350	3800	3800	1644,323035	5295,26135	0,132			
29	EPB	2+0	25-310	fin-juin	800	6500	6500	2938,446753	9612,007617	0,240			
30	EPB	2+0	25-310	juillet	683	4100	4100	1964,942553	6427,559993	0,161			
31	EPB	2+0	25-350A	mai	300	3600	3600	1538,04812	5031,137703	0,126			
32	EPB	2+0	25-350A		1000	12000	12000	5126,827087	16770,45901	0,419			
33	EPN	2+0	25-350A	fin-juin	550	4000	4000	1844,323035	6032,99925	0,151			

Figure 7. Tableau satellite de la masse des plants, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1e). Les valeurs des colonnes avec un en-tête vert sont des valeurs à fournir. Celles avec un en-tête rouge sont des calculs. Les boutons à droite de la figure donnent accès aux outils d'ajustement des courbes de teneur en eau des tissus (voir la section 2.1.2).

Ces informations sont nécessaires pour :

- établir la masse totale du récipient et de son contenu, sans l'eau et les plants (*MTrec*, kg), pour les mesures par pesée :

$$MTrec = \frac{MVrec + (Nc \times Vc \times Dsub) + Msilice + Macc}{1000}$$

où :

MTrec = masse totale du récipient et de son contenu (kg)

MVrec = masse à vide du récipient (g)

Nc = nombre de cavités par récipient

Vc = volume d'une cavité (cm^3)

Dsub = densité du substrat sec (g/cm^3)

Msilice = masse de la silice (g)

Macc = masse des accessoires (g)

- convertir les masses mesurées par pesées (*Mesure*) en teneur en eau du substrat (%, v/v) :

$$(\%v/v) = 1000 \times (\frac{Mesure - (MTrec + MPF)}{Nc \times Vc})$$

où :

Mesure = pesée du récipient sur le terrain (en kg, avec les plants frais) combinée à la variable suivante, externe au tableau des récipients

MTrec = masse totale du récipient et de son contenu (kg)

MPF = masse des plants frais (kg/récipient), selon les valeurs du tableau « Biomasses » (voir la section 2.1.2).

Nc = nombre de cavités par récipient

Vc = volume d'une cavité (cm^3)

- calculer la teneur en eau en « %, v/v », à partir de la lecture du *MP-917* (en nanosecondes), selon la relation décrite dans la section 1.4.1 pour les mesures par RDT;
- sélectionner la courbe de rétention d'eau appropriée pour le type de récipient utilisé;
- convertir en millimètres (mm ou L/m^2), le besoin d'irrigation exprimé initialement en teneur en eau volumétrique (%, v/v).

2.1.2 Masse sèche et rapport « masse fraîche/masse sèche »

L'utilisation de la pesée (gravimétrie) comme méthode de mesure de la teneur en eau du substrat nécessite l'estimation de la masse fraîche des plants, tel que décrit dans la section 1.4.2 (Figure 5). Or, cette estimation fait appel à la masse sèche des plants, dont la valeur est incertaine en fin de saison et souvent variable au début de la saison, d'une année à l'autre. Lorsqu'une masse sèche finale inappropriée est appliquée au profil d'évolution saisonnière de la masse sèche, il peut en résulter un biais dans l'estimation de la masse fraîche des plants, lequel s'accentuera plus la saison avance. Donc, parmi les données à caractère permanent, l'objectif recherché de masse sèche des plants de chaque culture exige une attention plus particulière, en début comme en cours de saison. Au besoin, la masse sèche des plants peut être ajustée, au cours de la saison, dans le tableau « Biomasses » (masses sèches des plants). Cette masse correspond à celle de *PLANTEC* ou *Plantec 2* (masses sèches de début et de fin de saison utilisées pour le calcul des calendriers des fertilisations par ces logiciels).

Le tableau « Biomasses » (Figure 1d : masses sèches des plants et figure 7) contient les informations suivantes :

- Essence;
- Âge;
- Récipient utilisé;
- Date de livraison;
- Masse sèche des plants en début de saison;
- Masse sèche des plants prévue en fin de saison.
- Fin corrigée (mg/plant), masse sèche (mg/plant), masse fraîche (mg/plant) et masse fraîche (kg/récipient) : **valeurs calculées** (voir les explications suivantes et la section 1.4).

À partir des masses sèches des plants de début et de fin de saison combinées au profil d'évolution saisonnière (commun à toutes les cultures), *IRREC* estime la masse sèche des plants pour la date courante (celle à laquelle les mesures de teneur en eau du substrat sont prises). À noter que pour les cultures livrées en cours de saison, *IRREC* doit effectuer une projection afin que la masse sèche finale des plants utilisée dans les calculs corresponde à celle qui serait théoriquement obtenue en fin de saison, si la culture était restée en pépinière et ce, même si cette valeur est hors d'atteinte en pratique.

La masse sèche des plants peut être combinée à l'un des cinq profils d'évolution saisonnière de rapports « masse fraîche/masse sèche » pour calculer la masse fraîche des plants. Chaque profil est associé à une culture selon le genre (ex. : *Picea*) de l'espèce cultivée. Le genre est désigné par la première lettre identifiant l'essence (ex. : épinette noire, épinette blanche : E pour épinette; pin gris, pin rouge : P pour pin).

Le tableau « Biomasses » donne accès aux outils d'ajustement des dates de début et de fin de saison ainsi qu'aux outils d'ajustement des courbes définissant le rapport « masse fraîche/masse sèche » pour chaque genre (à droite de la figure 7).

2.1.3 Caractéristiques des sondes RDT

Le tableau des caractéristiques des sondes RDT (Figure 1f) contient les paramètres nécessaires aux calculs pour la conversion des mesures du *MP-917*, de nanosecondes (ns : 10^{-9} sec) à des teneurs en eau volumétriques (%, v/v). Il rassemble les variables suivantes :

- *LS* : longueur de la sonde (en mm);
- *Ts/Tair* : rapport du temps de propagation de l'onde électromagnétique dans le sol sur celui de l'onde électromagnétique dans l'air.

Le rapport « Ts/Tair » est propre à un type de substrat donné (par exemple, un mélange de tourbe-vermiculite de 3 : 1 [%, v/v]). Le tableau permet d'utiliser un total de 25 combinaisons de « sonde RDT – type de substrat ».

2.1.4 Courbes d'évolution de la rétention d'eau du substrat en fonction de sa teneur en eau initiale

Dans nos dispositifs en pépinières, nous avons observé que, lorsque le substrat tourbeux devient trop sec, il se produit une augmentation significative des pertes d'eau par ruissellement, en raison des propriétés hydrophobes de la tourbe sèche. Bien que cet aspect ait été peu étudié dans la littérature, *IRREC* permet d'en tenir compte, de façon expérimentale, au moyen de deux courbes différentes de rétention d'eau en fonction de la teneur en eau initiale du substrat (avant l'irrigation) (Figure 8). Une première courbe s'applique aux récipients à parois pleines (ex. : 25-310) et l'autre, à ceux à parois ajourées (ex. : 25-350A), selon le type indiqué dans le tableau satellite des caractéristiques des récipients (Figure 1d et Figure 6). Le résultat calculé est un taux de rétention de l'eau d'irrigation par le substrat, en fonction de sa teneur en eau initiale avant l'irrigation. Sur cette base, un facteur de multiplication est appliqué au besoin d'irrigation de la culture, ce qui a pour effet d'augmenter, si nécessaire, le temps d'irrigation ou le nombre de passages de la rampe (voir aussi la section 1.5.2).

L'établissement d'un profil adéquat de rétention d'eau du substrat requiert certaines connaissances et une expérience approfondie de l'irrigation. Cet aspect s'adresse donc à des utilisateurs avertis. Les deux courbes proposées à la figure 8 sont d'ailleurs le résultat d'estimations et ne visent, pour l'instant, qu'à traduire de façon mathématique (et expérimentale), la prise en compte du facteur de rétention d'eau.

À noter que la courbe d'évolution du pourcentage de rétention d'eau du substrat, en fonction de sa teneur en eau initiale (Figure 8), ne tient pas directement compte de l'augmentation progressive de la rétention d'eau au cours de l'irrigation. C'est plutôt son profil qui prend implicitement ce facteur en compte, par le fait que de basses teneurs en eau nécessiteront habituellement des irrigations plus importantes.

De façon générale, la rétention d'eau des substrats tourbeux utilisés au Québec est faible lorsque le substrat est très sec (< 5 %, v/v) et augmente rapidement, jusqu'à 100 %, lorsque la teneur en eau du substrat atteint 30 %, v/v. L'amplitude limitée entre les seuils de teneurs en eau critiques (10 %, v/v) et ceux pour lesquels la rétention d'eau est complète (30 %, v/v), fait en sorte que le manque de précision de ce calcul a une influence limitée sur le calcul des besoins en irrigation, du moins pour les conditions qui prévalent dans les pépinières forestières du Québec. Il n'est cependant pas à exclure que certains raffinements soient apportés à ce paramètre dans les prochaines versions de *IRREC*.

2.1.5 Systèmes d'irrigation

Dans *IRREC*, chaque système d'irrigation a une identification unique.

Pour un asperseur fixe, le débit est exprimé en millimètres à l'heure (mm/h), alors que pour une rampe d'arrosage, il s'exprime plutôt en mm par passage de rampe mobile.

Tous les systèmes d'irrigation perdent de leur efficacité sous des conditions venteuses. Pour une même vitesse de vent, le taux de perte d'eau par dérive varie selon le type de système utilisé. Les expériences en pépinière de Gagnon et Girard (2001) ont démontré que l'influence du vent sur la dérive était moins marquée pour les rampes

mobiles que pour les gicleurs. C'est pourquoi *IRREC* permet à l'utilisateur d'entrer un taux d'efficacité propre à chaque système d'irrigation, lequel, une fois combiné à la vitesse du vent, est appliqué aux cultures extérieures (voir aussi la section 1.5.4).

D'autres pertes d'eau sont directement reliées au système d'irrigation : les cultures irriguées au moyen de rampes d'arrosage munies de jets à débit trop élevé (ex. : jets 8010 générant un débit de 20 000 L/ha par passage) ne peuvent retenir toute l'eau déversée lors d'un passage. C'est pourquoi *IRREC* permet d'entrer un taux de rétention qui prendra en compte ces pertes d'eau par ruissellement hors des cavités. Les informations du tableau satellite (Figure 1c) sont reportées dans le tableau central (Figure 1b) en se basant sur le système d'irrigation utilisé pour chaque culture.

Afin de fournir au personnel de terrain des prescriptions d'irrigations faciles à interpréter, il faut préciser à *IRREC* les performances de base des systèmes d'irrigation (en mm/heure ou en mm/passage de rampe), ainsi que les facteurs liés à l'influence des conditions ambiantes sur la performance de ces systèmes (voir la section 1.2.4). Sans ces informations, *IRREC* calculera seulement un besoin d'irrigation exprimé en millimètres (mm) d'eau, ce qui rend plus difficile la concrétisation des actions par le pépiniériste.

Les prescriptions d'irrigation exprimées en mm impliquent obligatoirement l'installation de pluviomètres pour être contrôlées. Si leur nombre et leur répartition spatiale sont adéquats, ils peuvent aider à estimer l'uniformité d'irrigation, et ce, même s'ils sont difficiles à surveiller en cours d'irrigation,

Le débit des systèmes d'irrigation doit, lui aussi, être contrôlé régulièrement et en appliquant une méthode rigoureuse.

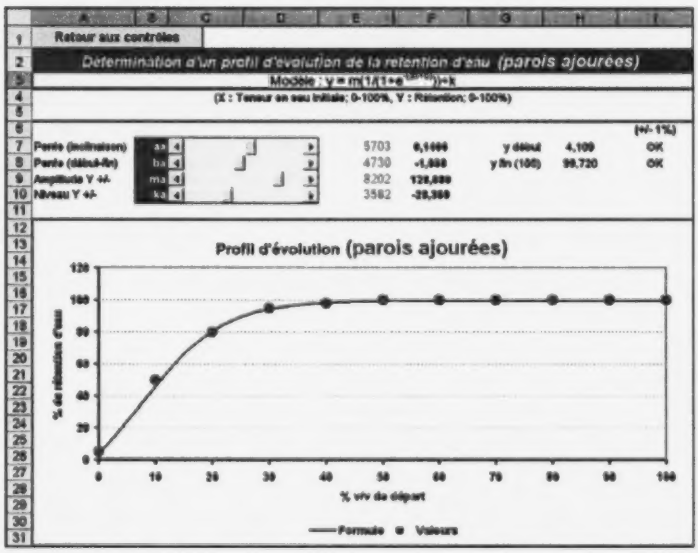


Figure 8. Exemple d'une courbe de rétention d'eau en fonction de la teneur en eau initiale du substrat, utilisée par *IRREC*, telle qu'elle apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1g). La tourbe à base de mousse de sphaigne utilisée au Québec est hydrophobe lorsqu'elle est sèche. Par contre, sa capacité à retenir l'eau augmente très rapidement au fur et à mesure qu'elle se réhydrate. La rapidité de réhydratation diffère selon le type de parois du récipient (pleines ou ajourées).

2.2 Entrées quotidiennes

2.2.1 Liste des cultures et des variables de contrôle de l'irrigation

Toutes les variables nécessaires au calcul des besoins d'irrigation de l'ensemble des cultures en récipients d'une pépinière sont regroupées dans le **tableau central** de *IRREC* (Figure 1b et Figure 9), qui constitue en quelque sorte le « centre de calcul » des besoins d'irrigation de toutes les cultures en récipients. Les calculs effectués dans ce tableau sont ensuite reportés dans ceux qui présentent les résultats (voir le chapitre trois).

Chaque culture est identifiée par un nom de code unique (Figure 9). Des outils complémentaires permettent de confirmer l'exclusivité du nom de chaque culture. Des informations complémentaires détaillent les éléments d'identification et de localisation de chaque culture :

- Identification de la culture : nom de code unique pour chaque culture;
- Localisation de la culture : ID, zone, aire, portion, vanne de contrôle de l'irrigation et matricule*;
- Essence;
- Âge;
- Récipient : en lien avec le tableau des caractéristiques des récipients (voir la section 2.1.1 et les figures 1d, 1g et 6);
- Date de livraison (voir la section 2.1.2);
- Sonde RDT : en lien avec le tableau des caractéristiques des sondes RDT (voir la section 2.1.3 et la figure 1f);
- Nbre Obs : le nombre d'observations nécessaires pour assurer la fiabilité des calculs;
- Couvert? : la culture est-elle produite sous tunnel (à l'abri des précipitations) ou à l'extérieur? (Il faut l'indiquer afin de retrancher ou non les prévisions de pluie);
- Tourbe : densité de la tourbe (g/cm^3)**;
- Silice : masse de la silice (g)**;
- Occ : taux d'occupation des cavités (%)**;
- Teneurs en eau (Moy./Min./Max.) : **valeurs calculées** à partir des mesures prises sur le terrain (voir la figure 1b);
- Système d'irrigation : le système d'irrigation associé à la culture (asperseurs fixes, rampes mobiles, etc.), en lien avec le tableau des systèmes d'irrigation (voir la section 2.1.5 et la figure 1c);
- Affaissé : l'affaissement de la tourbe par rapport au haut de la cavité du récipient (cm)**. Si l'écart entre le haut de la cavité du récipient et la surface du substrat d'une culture en particulier est significatif, l'affaissement indiqué pour cette culture corrige le volume de substrat afin de compenser la baisse de sa capacité à retenir l'eau. Les cibles de teneurs en eau sont réduites en proportion du volume résiduel de substrat par rapport à celui de la cavité, selon le calcul suivant :

$$Ccor = Cini \times (\frac{Hcav - Aff}{Hcav})$$

où :

$Ccor$ = cible corrigée en fonction de l'affaissement (%, v/v);

$Cini$ = cible initiale (%, v/v);

$Hcav$ = hauteur de la cavité (cm);

Aff = affaissement (écart entre la surface de la tourbe et le haut de la cavité; cm).

- Paramètres (Moyennes) et Paramètres (Limites) : les seuils de teneurs en eau du substrat de chacune des stratégies (%, v/v);
- Stratégies : le choix d'une stratégie de gestion des teneurs en eau du substrat (moyennes ou limites) :
  - Stratégie par moyennes : lorsque la moyenne des mesures est en deçà du minimum fixé, calculer le besoin d'irrigation afin de ramener la teneur en eau moyenne au seuil maximum souhaité (cible) pour cette stratégie.
  - Stratégie par limites : lorsque la mesure la plus basse atteint le seuil minimum fixé pour cette stratégie, calculer le besoin d'irrigation pour faire en sorte que la teneur en eau résultante la plus élevée demeure sous le seuil maximum;

---

* Les noms de variables proposés pour la localisation des cultures ne sont que des suggestions. Ces variables servent à créer des regroupements ou des subdivisions en vue de tris ultérieurs. Les en-têtes de ces colonnes sont modifiables au besoin.

** Ces variables sont facultatives car elles possèdent chacune une valeur par défaut. Elles seront remplacées par celles qui leur seront données explicitement dans le tableau central de *IRREC* (Figure 1b).

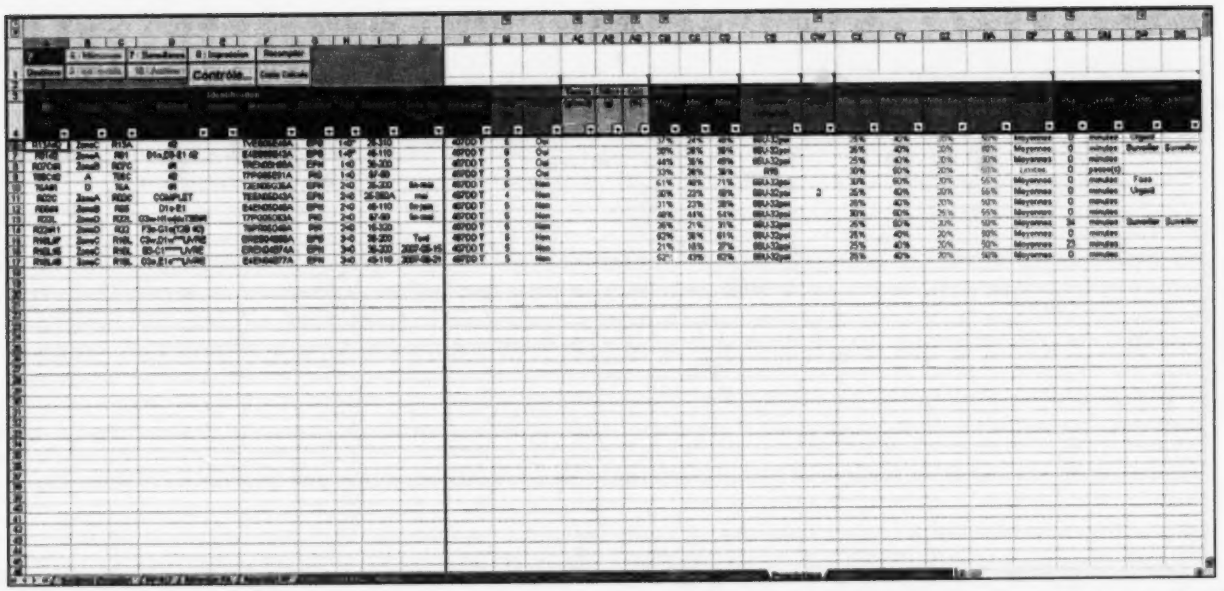


Figure 9. Tableau central de *IRREC*, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir aussi la figure 1b). L'annexe 1 contient la liste de toutes les variables qui n'apparaissent pas à l'écran. Les valeurs des colonnes avec un en-tête vert sont modifiables. Celles des colonnes avec un en-tête jaune servent à corriger des variables pour lesquelles il existe une valeur par défaut. Les colonnes avec un en-tête rouge sont des calculs.

- Irrig. : irrigation recommandée (**valeur calculée**);
- Unité : déterminée en fonction du système d'irrigation sélectionné (**valeur calculée**, minutes ou nombre passages de rampe);
- Tour et centre : irrigation de bordure selon les codes saisis sur le terrain;
- Remarque : remarque saisie sur le terrain.

2.2.2 Saisie des données de terrain

Le tableau de saisie des données de terrain (Figure 1a et Figure 10) contient les données utiles à l'alimentation du tableau central de *IRREC* (Figure 1b) :

- ID et zone : identification de la culture (plusieurs lignes créées dans le tableau de saisie pour chaque culture, en fonction du nombre d'observations préconisées dans le tableau central);
- Hr : heure de la mesure de teneur en eau du substrat;
- Rem : remarque;
- kg, nsec ou %v/v : mesure de teneur en eau du substrat (trois méthodes possibles : par pesée (kg), à l'aide du *MP-917* (ns) ou directement par « %, v/v »; sans calcul de conversion). La méthode de calcul de teneur en eau du substrat utilisée (poids, volume) est ajustée automatiquement en fonction de l'endroit où les valeurs sont saisies;
- Bordures – tour ou centre : codes pour la gestion de l'irrigation des bordures.

Bien que les mesures puissent être saisies directement dans *IRREC*, il est aussi possible de les saisir sur le terrain, à l'aide d'un ordinateur de poche muni d'un logiciel de saisie qui utilise *Excel Mobile*, une version simplifiée d'*Excel* (voir aussi la section 4.3). Ceci facilite la gestion de l'irrigation à grande échelle. Pour utiliser le logiciel de l'ordinateur de poche (*IRREC mobile*), l'usager devra préalablement planifier son échantillonnage, en définissant le nombre d'observations pour chaque culture répertoriée dans le tableau central de *IRREC* (voir la Figure 9; colonne « NbreObs »).

IRREC mobile ne permet pas de valider les données saisies sur le terrain. Les données sont validées par des fonctions automatisées sur l'ordinateur de bureau, lors de leur importation (voir aussi la section 4.3). Les résultats de ces traitements sont incorporés dans le tableau central, selon les calculs détaillés à la section 1.5.

Par ailleurs, *IRREC* mobile permet de calculer les besoins en irrigation sur le terrain. La formation du personnel est alors particulièrement importante, si l'on souhaite tirer avantage des capacités de l'ordinateur de poche en toute connaissance de cause.

2.2.3 Conditions météorologiques

Les résultats incorporés dans le tableau central de *IRREC* tiennent compte des conditions météorologiques (Figure 1h), selon les calculs détaillés aux sections 1.5.4 et 1.5.5. Celles-ci doivent être précisées avant le début de chaque calcul des besoins d'irrigation, afin d'ajuster correctement les résultats selon les paramètres du tableau 1. Les calculs tiennent compte des variables suivantes :

- précipitations prévues (mm et probabilité, en %);
- vent (nul, faible, moyen ou fort);
- ensoleillement (nuageux, variable ou ensoleillé);
- température (20 °C et moins, 20 à 25 °C, 25 à 30 °C ou 30 °C et plus);
- humidité relative (sec, confortable ou humide).

À l'exception des précipitations, fournies en valeurs numériques, les conditions météorologiques anticipées sont saisies sous forme de classes, puis converties en valeurs numériques selon les barèmes définis dans le tableau 1. Le produit de ces valeurs correspond au facteur de correction utilisé pour les conditions météorologiques (FCM), dans les calculs de la section 1.5.4. Bien que cette correction permette aux teneurs en eau après l'irrigation de se rapprocher d'avantage de la valeur ciblée par le pépiniériste, elle est d'une précision limitée. Une chose est certaine, le vent est le facteur prépondérant. La nécessité de préciser les autres conditions météorologiques devra être réévaluée, car l'effet de ces dernières semble faible, compte tenu de la précision d'application des irrigations.

Aucun système d'irrigation n'est plus efficace que la pluie, en terme d'uniformité. Il est donc avantageux de prévoir les apports d'eau sous forme de pluie, malgré l'incertitude liée aux prévisions météorologiques. Les marges de sécurité assurées par des teneurs en eau minimales judicieusement choisies devraient normalement permettre d'éviter de mettre en péril les cultures, tout en profitant de l'uniformité de l'irrigation offerte par la pluie.

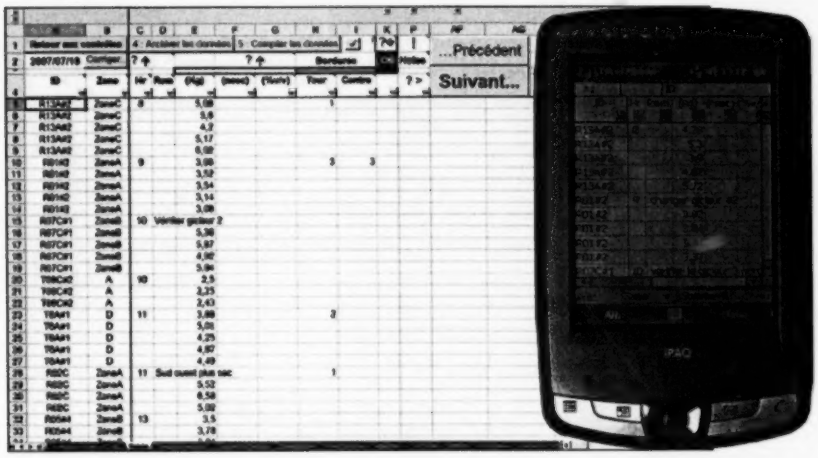


Figure 10. Tableau de saisie des mesures effectuées sur le terrain, sur l'ordinateur de poche et sur le PC, tel qu'il apparaît à l'écran de chacun des ordinateurs (voir aussi la figure 1a).

Chapitre trois

Les sorties

Les sorties de *IRREC* sont destinées à permettre au pépiniériste de visualiser la situation actuelle des teneurs en eau du substrat, ainsi que leur évolution récente. Les prescriptions d'irrigations proposées lui permettront d'atteindre les cibles de teneurs en eau du substrat pour ses cultures en récipients.

3.1 Portrait graphique des teneurs en eau du substrat et paramètres de contrôle

IRREC propose deux types de graphiques pour analyser l'état des teneurs en eau du substrat. Le premier donne une vue d'ensemble de l'état actuel des teneurs en eau de toutes les cultures de la pépinière. Le second illustre l'évolution récente des teneurs en eau, pour une culture à la fois.

3.1.1 Portrait global des cultures

Une représentation graphique de l'état hydrique de toutes les cultures en même temps (jusqu'à 250) aurait posé un problème d'interprétation pour l'usager. C'est pourquoi le graphique de surveillance de l'état hydrique n'illustre que dix cultures à la fois. Il s'agit d'un graphique « mobile », muni d'une barre de défilement, qui permet de parcourir rapidement chacune des cultures sur le graphique (Figure 11).

Les teneurs en eau du substrat sont illustrées sous forme d'histogramme (Figure 11). Les barres pleines (de couleur) indiquent les seuils inférieurs de teneur en eau de chacune des deux stratégies possibles de gestion des teneurs en eau du

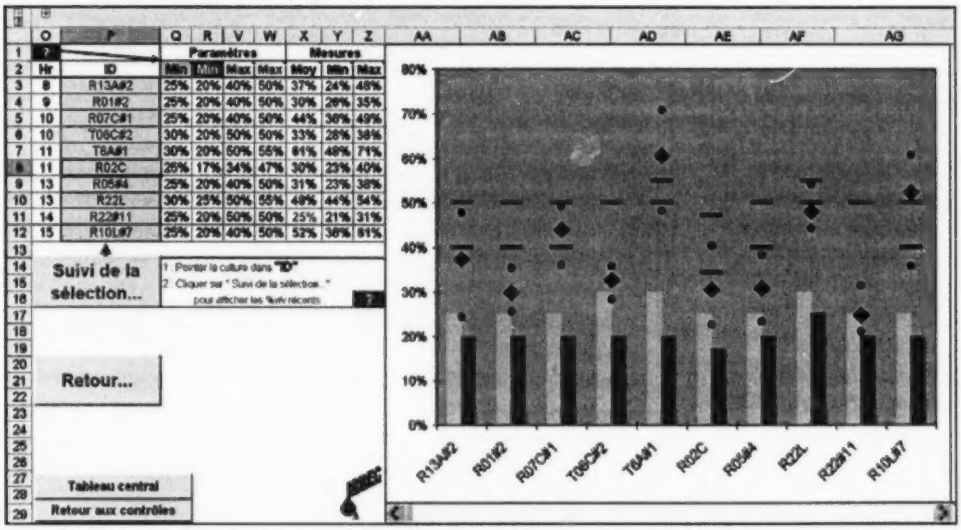


Figure 11. Graphique de surveillance de l'état de la teneur en eau du substrat, selon les plus récentes mesures, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir la figure 1i et la section 3.1.1). Les losanges et les points représentent les moyennes de teneur en eau ainsi que les valeurs minimales et maximales mesurées sur le terrain. Les barres pleines représentent les seuils pour lesquels une irrigation est requise (selon la stratégie choisie : jaune; moyennes, rouge; limites). Les traits représentent les cibles (bleu; moyennes, rouge; limites). La barre de défilement au bas du graphique permet de visualiser les cultures suivantes ou précédentes. Les boutons permettent de naviguer dans le logiciel.

substrat (barres rouges : stratégie par limites; barres jaunes : stratégie par moyenne; voir la section 2.2.1). Les traits de couleur indiquent les cibles à atteindre après l'irrigation, selon chacune des stratégies (traits rouges : stratégie par limites; traits bleus : stratégie par moyennes). Les points noirs indiquent les observations de terrain (cercles : minimum et maximum; losanges : moyenne).

Les cultures affichées sur le graphique sont identifiées par un numéro (ID), visible dans le coin supérieur gauche de l'écran (Figure 11, colonne P). À cet emplacement, il est possible de sélectionner la culture dont on souhaite visualiser l'évolution des teneurs en eau du substrat en la pointant, puis en cliquant sur le bouton « Suivi de la sélection... » pour afficher l'évolution d'une culture à la fois.

3.1.2 Portrait ciblé d'une culture à la fois

L'évolution des teneurs en eau du substrat peut être visualisée pour une culture à la fois, pour les deux dernières semaines, à l'aide du graphique de la figure 12 (pour autant que les mesures soient effectuées sur une base temporelle régulière). Ce graphique représente les valeurs moyennes, minimales et maximales des mesures prises sur le terrain. Les seuils minimaux et maximaux sont également affichés (pointillés jaunes). Des boutons de commande facilitent la navigation d'un graphique à l'autre.

3.2 Prescriptions d'irrigation

La prescription d'irrigation est le principal résultat des calculs de *IRREC*. Le tableau des prescriptions d'irrigation (Figure 13) contient les informations utiles pour guider le travail d'irrigation de chacune des cultures. Ces informations sont extraites du tableau central (voir les sections 1.3 et 2.2.1), grâce aux fonctions de tableau croisé dynamique d'*Excel*.

Les informations affichées sur le tableau de prescriptions se divisent en sept classes :

- l'identification territoriale (colonnes avec un en-tête en jaune; modifiable);
- l'identification des cultures (colonnes avec un en-tête en gris foncé; non modifiable);

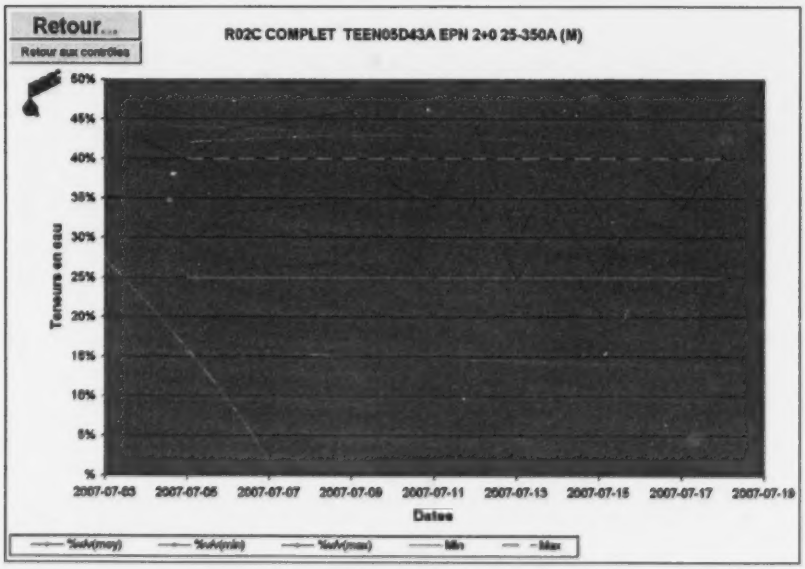


Figure 12. Suivi de l'évolution des teneurs en eau pour une culture à la fois, au cours des 14 derniers jours (moyennes, valeurs minimales et maximales mesurées sur le terrain). Le trait jaune plein représente le seuil à partir duquel une irrigation est requise (selon la stratégie choisie; moyenne ou limites). Le trait jaune pointillé représente la cible. (Voir aussi la figure 1i).

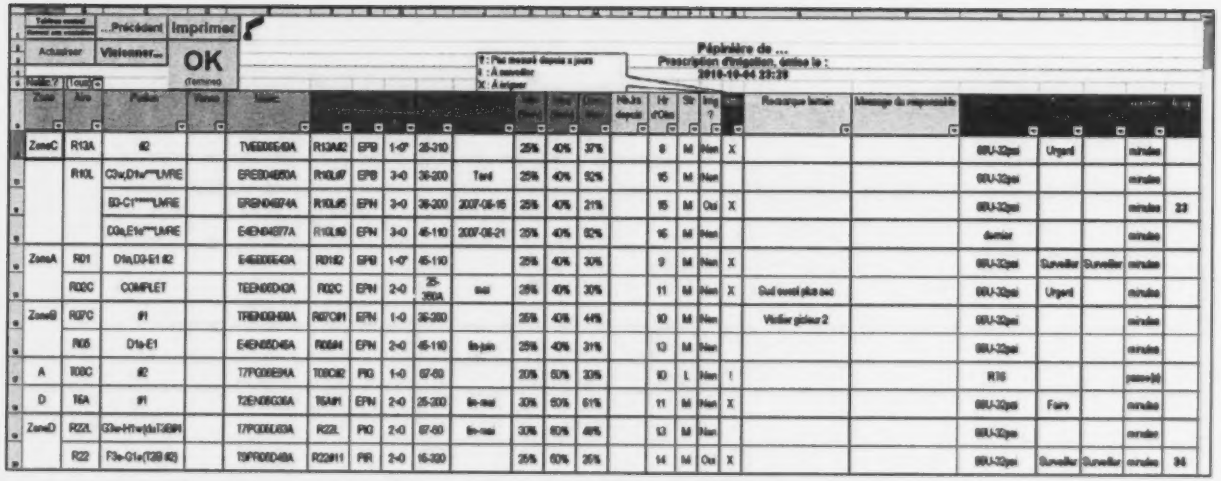


Figure 13. Tableau de prescription d'irrigation produit par *IRREC*, tel qu'il apparaît à l'écran de l'ordinateur (voir la figure 1i). L'utilisateur peut personnaliser l'impression de ce tableau (voir la section 3.2).

- les statistiques des teneurs en eau du substrat (colonnes avec un en-tête en gris moyen; non modifiable);
- les informations de surveillance sur le terrain (colonnes à en-tête gris pâle ou rouge; non modifiable);
- les informations pour guider l'irrigation (colonnes à en-tête noir; non modifiable);
- les informations liées aux pesées (seuils inférieurs et supérieurs, exprimés en kg);
- les remarques consignées par le personnel de terrain (remarque terrain) ou des messages du responsable des prescriptions d'irrigation (message du responsable).

À la base, le tableau de prescriptions de *IRREC* contient toutes les colonnes susceptibles d'être pertinentes. Les nombreuses combinaisons offertes permettent au pépiniériste de personnaliser ce tableau et d'en adapter la présentation en fonction de ses besoins particuliers, tant au niveau des informations inscrites que de la mise en page. Cependant, seules les fonctions d'*Excel* qui ne modifient pas la structure du tableau croisé dynamique peuvent être utilisées. Par exemple, les colonnes jugées non pertinentes dans le contexte de la pépinière peuvent être masquées en mettant leur largeur à « 0 » (sans les supprimer), grâce à la fonction de base d'*Excel* prévue à cette fin. Il est aussi possible de trier les informations ou de ne faire apparaître que les cultures nécessitant une irrigation, à l'aide des fonctions de base du tableau croisé dynamique. L'en-tête des colonnes reliées à la localisation peut aussi être adaptée, tout comme celles du tableau central de *IRREC* (voir la section 2.2.1).

La gestion de l'irrigation de seulement quelques cultures en récipients ne constitue pas nécessairement un défi majeur pour le pépiniériste. Cependant, la tâche devient plus ardue si celui-ci doit en gérer plusieurs dizaines. Des fonctions de rappels ont donc été intégrées au tableau des prescriptions d'irrigation (Figure 13) afin d'aider les utilisateurs à garder une vue d'ensemble de toutes les productions, en se basant sur les données archivées au cours des jours précédents et des paramètres prédéfinis (mais modifiables; voir la section 4.4). Ainsi, le tableau de prescriptions mettra en évidence les situations suivantes, pour chaque culture :

- nombre de jours depuis la dernière mesure : Colonne « *Nbre Jrs depuis* »;
- la culture devrait normalement avoir été irriguée (oui ou non) depuis les dernières observations affichées au tableau (selon les prescriptions, mais pas nécessairement selon l'exécution sur le terrain) : Colonne « *Irrig ?* »;
- la culture n'a pas été mesurée depuis « x » jours (valeur fixée par défaut à 3, voir la section 4.4) : Colonne « *Attn!* », valeur « ? »;
- la culture est à surveiller (la plus récente teneur en eau du substrat mesurée est à moins de 5 %, v/v de la limite inférieure) : Colonne « *Attn!* », valeur « ! ».

3.3 Archivage des informations

Les informations nécessaires au fonctionnement quotidien de *IRREC* sont conservées à l'intérieur du fichier principal (IRREC.xls). Afin de limiter le volume du fichier principal, les informations qui ne sont plus indispensables à son fonctionnement quotidien sont effacées au fur et à mesure. Elles sont cependant archivées dans des fichiers externes, ce qui permet d'en conserver la trace en vue d'analyses ultérieures.

3.3.1 Archivage des observations de terrain

Une fois qu'elles ont été utilisées pour le traitement des données et la mémorisation des informations complémentaires (remarques, etc.), les observations de terrain (décrites à la section 2.2.2) ne sont plus nécessaires au fonctionnement de *IRREC*. Elles sont donc immédiatement archivées dans un fichier, nommé par défaut « ArchivesTerrain.xls », qui garde la trace intégrale de toutes les données ayant servi à alimenter *IRREC*, avec la date de référence.

3.3.2 Archivage des statistiques quotidiennes

Les statistiques quotidiennes (teneurs en eau minimales, maximales et moyennes) sont conservées dans le fichier principal de *IRREC* pour une période de 14 jours. Elles servent à tracer les graphiques de suivi et générer des mises en garde dans le tableau de prescriptions d'irrigation. Après ce délai, elles sont transférées du fichier principal vers un fichier d'archives, nommé par défaut « ArchivesRésultats.xls ». Ce fichier d'archives garde la trace des teneurs en eau, avec l'identification de la culture et la date de référence, soit pour une utilisation immédiate par le système *FERTIRREC* (en cours de conception) ou à des fins d'analyses indépendantes.

Chapitre quatre

Modes de fonctionnement et cadre d'utilisation de *IRREC*

Même si *Excel* est un outil de conception souple, il constitue un environnement fragile, dans le cadre d'une utilisation quotidienne par des non-initiés. Il est donc primordial de sécuriser *IRREC* pour une utilisation par le personnel de terrain des pépinières. Afin de prévenir d'éventuels dommages au fichier principal, un accès limité aux fonctions de base de *IRREC* a donc été prévu. Ainsi, deux configurations sont disponibles pour les utilisateurs de *IRREC*.

4.1 Mode sécurisé

Le mode sécurisé de *IRREC* ne requiert pas de mot de passe de la part de l'usager. Il est destiné à une utilisation quotidienne par le personnel de terrain. L'exécution de toutes les étapes menant à l'émission des prescriptions d'irrigation est encadrée par des macro-instructions (macros) *Excel*. Les usagers ne peuvent pas effectuer de modifications illicites sous ce mode. Si des ajustements de paramètres sont nécessaires, les usagers doivent faire appel à un superviseur qui a accès au mode ouvert.

4.2 Mode ouvert

Le mode ouvert de *IRREC* est réservé aux usagers qui doivent superviser son fonctionnement. Ces derniers évoluent alors dans un environnement « normal » d'*Excel*, sans aucune restriction. Des modifications inappropriées peuvent par conséquent empêcher le bon fonctionnement de *IRREC*. Toutes les modifications effectuées sous ce mode doivent donc être effectuées avec la plus grande prudence. Une fonction de réinitialisation permet toutefois de corriger la plupart des modifications inappropriées.

L'accès à ce mode peut être contrôlé par un mot de passe, qui empêche les non-initiés d'y avoir accès (Figure 14).

4.2.1 Personnalisation des paramètres du système

Le mot de passe donnant un accès contrôlé au mode ouvert de *IRREC* est un paramètre modifiable. Lorsque l'usager responsable de l'irrigation des plants de la pépinière fait appel à du personnel non initié en informatique, il a avantage à l'utiliser pour protéger l'intégrité de *IRREC* et rassurer les usagers non initiés.

Figure 14. Page d'accueil de *IRREC*. La saisie du mot de passe donne accès au contenu intégral de la feuille *Excel*. Le bouton « Démarrer » active le processus d'émission des prescriptions en mode « sécurisé ». Un hyperlien (« En cas de doute,... ») affiche le manuel de l'usager.

Si un ordinateur de poche « *Windows Mobile* » est utilisé, il faut absolument indiquer l'emplacement du fichier « *IRREC mobile* » afin de pouvoir utiliser *IRREC* facilement et efficacement (voir les sections 2.2.2 et 4.3).

Pour plus de souplesse, certains des paramètres d'utilisation de *IRREC* peuvent être ajustés manuellement par l'usager. C'est notamment le cas du délai tolérable sans mesure (fixé par défaut à trois jours) et du tampon de teneur en eau avant de générer un message d'avertissement (fixé par défaut à 5 %, v/v; voir la section 3.2). Par ailleurs, le biais induit par certains modèles de pesons peut être compensé au moyen de paramètres de personnalisation (voir la section 1.4.2).

Les autres paramètres modifiables sont plus accessoires, puisqu'ils ne concernent que les noms de fichiers et leur emplacement.

4.3 Option de saisie et de calcul sur le terrain (*IRREC mobile*)

IRREC mobile permet de saisir les données sur le terrain au moyen d'un ordinateur de poche (voir la section 2.2.2) et de les transférer vers *IRREC*, sur

l'ordinateur de bureau, à l'aide du logiciel *ActiveSync* et des macros de *IRREC*. Il permet aussi de calculer les besoins d'irrigation directement sur le terrain, au cas où la situation semblerait urgente et qu'il faille éventuellement déclencher une irrigation immédiate. *IRREC mobile* utilise exactement les mêmes paramètres que le système principal de *IRREC* et arrive exactement aux mêmes résultats, en matière de prescriptions d'irrigation. Toutefois, pour la mise à jour des paramètres de calcul, il reste dépendant de *IRREC* (sur l'ordinateur de bureau). Cependant, lors de la procédure sécurisée de traitement des données, tous les paramètres utiles sont transférés automatiquement vers l'ordinateur de poche.

4.4 Traitement des informations complémentaires (bordures et remarques)

En plus des données liées aux mesures de teneurs en eau du substrat, *IRREC* permet de traiter deux types d'informations complémentaires :

- des remarques textuelles;
- des codes pour gérer l'irrigation des bordures de l'aire de culture.

Les remarques textuelles saisies dans *IRREC* (ou *IRREC mobile*) sont transférées intégralement depuis le tableau de saisie des données de terrain ou de l'ordinateur de poche (voir la section 2.2.2), vers le tableau de prescriptions (voir la section 3.2).

Les codes de gestion pour l'irrigation des bordures de l'aire de culture sont reportés de la saisie vers le tableau de prescriptions, de la même manière que les remarques. Les valeurs de ces codes sont les suivantes :

- 1 : urgent;
- 2 : à faire;
- 3 : à surveiller.

Conclusion

Le système *IRREC* s'avère un outil pratique et efficace de gestion de l'irrigation des cultures en récipients pour les pépiniéristes du Québec. Peu de méthodes de gestion de l'irrigation sont actuellement en mesure de fournir des instructions aussi claires, précises et faciles d'application. *IRREC* permettra aux pépiniéristes de produire des plants en récipients de qualité, tout en assurant une protection accrue de la qualité des eaux souterraines.

Les principes de calcul des besoins d'irrigation des plants en récipients produits en pépinières forestières, proposés par le logiciel *IRREC*, ont été testés et validés avec succès dans des dispositifs expérimentaux de la DRF (MRNF) à la pépinière de Saint-Modeste (DGPSP, MRNF). Il est toutefois important de souligner que toutes les données ayant servi à tester et à valider les calculs de *IRREC* ont été recueillies dans des conditions expérimentales optimales. En effet, les procédures d'échantillonnage des teneurs en eau du substrat y étaient très rigoureuses. Les données environnementales étaient recueillies sur le terrain, plusieurs fois par jour, à l'aide de systèmes automatisés d'enregistrement de données (CR10X), consignant les données journalières à toutes heures. De plus, l'irrigation des plants de ces dispositifs expérimentaux (plants de fortes dimensions d'épinette blanche 2+0 en récipients 25-310) était assurée par des rampes d'arrosage (robots), appareils les plus précis eu égard à l'uniformité d'irrigation des cultures en récipients.

Ces conditions optimales ne prévalent habituellement pas dans le contexte de production de plants en récipients à grande échelle des pépinières forestières du Québec (Gagnon 2008). C'est pourquoi *IRREC* a ensuite été testé dans des conditions de production à grande échelle, dans deux pépinières forestières publiques du Québec (Normandin et Grandes-Piles, DGPSP, MRNF), au cours des saisons 2008 et 2009. Les calculs effectués par *IRREC* se sont révélés suffisamment précis pour gérer efficacement l'irrigation des cultures en récipients, lorsque l'intensité d'échantillonnage était suffisante pour fournir un portrait fiable des teneurs en eau du substrat. L'ensemble du système (*IRREC* et *IRREC mobile*) s'est également montré fiable, efficace et convivial pour gérer l'irrigation des plants en récipients de ces pépinières forestières. Il a notamment permis de simplifier le travail du personnel technique, tout en accordant une autonomie accrue au personnel de terrain. Les différentes fonctions du système *IRREC* se sont avérées utiles, tant au niveau des prescriptions d'irrigation imprimées à partir d'un ordinateur de bureau (PC), que des calculs effectués sur le terrain avec l'ordinateur de poche (*IRREC mobile*).

La méthode de mesure des teneurs en eau des substrats par gravimétrie peut sembler attrayante pour toutes les cultures en récipients, car le matériel nécessaire est très peu coûteux, contrairement à la RDT (Topp et Davis,1985) ou aux tensiomètres (Bettez et Gadbois 2007). Toutefois, avant d'être en mesure d'en recommander l'utilisation pour les cultures extérieures 2+0 produites en récipients, des mesures supplémentaires du rapport « masse fraîche/masse sèche » sont nécessaires, afin de préciser l'évolution saisonnière de ce paramètre en fonction du genre (*Picea*, *Pinus*, *Larix*,...). Ce n'est qu'à cette condition que les pesées de récipients fourniront des mesures plus précises de la teneur en eau du substrat. Pour l'instant, la masse totale mesurée (récipient, tourbe sèche, silice, plants frais et eau du substrat) semble influencée en premier lieu par l'accroissement de la masse sèche des plants au cours de la saison, même si le rapport « masse fraîche/masse sèche » peut varier du simple au double, d'après nos premières évaluations. En fin de saison, c'est plutôt la masse fraîche des plants qui influence le plus les mesures par pesée (gravimétrie). Toutefois, en automne, les teneurs en eau du substrat tendent aussi à demeurer élevées, pour les essences résineuses produites dans les pépinières forestières du Québec. Dans ces conditions, la masse fraîche des plants influence peu la masse totale mesurée par gravimétrie, en comparaison avec l'eau dans le substrat.

La possibilité d'utiliser la RDT, à l'aide des sondes d'humidité du *MP-917*, pour la mesure des teneurs en eau volumétriques (%, v/v), rend théoriquement possible l'adaptation de *IRREC* à des fins de production de plants à racines nues. Des essais pourraient être effectués afin d'explorer cette possibilité.

Dans une perspective de développement, la souplesse de l'environnement *Excel* favorise les ajustements au contexte de production de plants. *IRREC* est appelé à devenir une composante essentielle d'un système plus sophistiqué (*FERTIRREC*; actuellement en cours d'élaboration), lequel permettra une gestion intégrée de l'irrigation et de la fertilisation des cultures en récipients.

Références bibliographiques

BERGERON, O, M.S. LAMHAMEDI, H. MARGOLIS, P.Y. BERNIER et D.C. STOWE, 2004. *Irrigation control and physiological responses of nursery-grown black spruce seedlings (1+0) cultivated in air-slit containers*. HortScience 39 : 599-605.

BETTEZ, M. et P. GADBOIS, 2007. *Hortimètre Ts : un outil de gestion de l'irrigation en pépinière à découvrir... Bilan des essais avec les tensiomètres Hortau à la Pépinière forestière de Berthier*. Des plants et des hommes 10(3) : 2-6.

CARON, J., 2001. *La tourbe et les milieux artificiels*. Dans : *Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Chapitre 20*. Payette, S. et L. Rochefort (éditeurs). Les Presses de l'Université Laval, Sainte-Foy, Québec, p. 399-410.

GAGNON, J., 2008. *Tableaux de calculs des pertes annuelles d'azote (N) par lessivage à l'échelle de la pépinière - Bilan 2003 des six pépinières publiques du Québec*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 497. 32 p.

GAGNON, J., 2009. *Impact des différentes formes d'azote (Urée, NH_4^+, NO_3^-) sur la croissance des plants et sur le lessivage des engrais*. Dans : *Recueil des conférences - Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers dédiée aux pépinières forestières du Québec*]. Lamhamedi, M.S. et B.-M. Gingras (éditeurs). ISBN 978-2-550-56289-4. 15 avril 2009, Québec, Canada. 72 p. Cédérom.

GAGNON, J. et D. GIRARD, 2001. *Bilan des pertes saisonnières de nitrates (NO_3^-) et d'eau sous une culture d'épinette blanche 2+0 produite dans le récipient 25-350A*. Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 466. 36 p.

GAGNON, J. et D. GIRARD, 2009. *Coupling of two new methods to optimize water and fertilizer uses in view to preserve groundwater quality under forest tree nursery conditions*. Résumé d'une affiche présentée lors du XIII[e] Congrès forestier mondial. 18-23 octobre 2009. Buenos Aires, Argentine. 1 p.

GINGRAS, B.-M. et A. DÉZIEL, 2006. *Présentation du logiciel* « Plantec 2 ». Conférence présentée au 4[e] atelier sur la production de plants forestiers au Québec : Facteurs et techniques culturales influençant le développement racinaire des plants en pépinière forestière. Hôtel Clarion, Sainte-Foy, Québec, 15 et 16 mars 2006. 2 p.

GINGRAS, B.-M. et J. GAGNON, 2003. *En route vers* Plantec 2. Journal de la DPSP : Des plants et des hommes 6 (3) : 4. Septembre 2003.

GINGRAS, B.-M., A. DÉZIEL et C. PESCARUS, 2007. *Guide des fonctions du logiciel* Plantec 2. Document interne de la DGPSP remis aux participants lors des sessions de formation de Plantec 2. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction générale des pépinières et des stations piscicoles. 81 p.

GINGRAS, B.-M., D. GIRARD, M. RENAUD, S. RICHARD et G. LAMBANY, 1999. *Guide pratique pour la culture de plants de fortes dimensions d'épinette blanche dans des récipients de 350 cm³*. Ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière. Rapport interne n° 445. 31 p.

GIRARD, D., 2008. IRREC : *Développement d'une méthode de calcul des besoins en irrigation pour les plants forestiers cultivés en récipients*. Formation destinée au groupe technique de la Direction générale des pépinières et des stations piscicoles du ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 14 mars 2008. Québec, Canada. 84 p.

GIRARD, D., 2009. *La fertilisation des plants forestiers cultivés en récipients : Les éléments de base et une vue d'ensemble*. Dans : *Recueil des conférences - Session de formation sur la nutrition minérale des plants forestiers dédiée aux pépinières forestières du Québec*. Lamhamedi, M.S. et B.-M. Gingras (éditeurs). ISBN : 978-2-550-56289-4, 15 avril 2009, Québec, Canada. 72 p. Cédérom.

GIRARD, D., 2010. IRREC [ressource électronique] : *Système de calcul des besoins en IRrigation pour les cultures de plants forestiers en RÉCipients* / conception, programmation et rédaction de la documentation, Daniel Girard. — Données et programme électroniques. — Québec : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. — 1 CD-ROM; 12 cm. Configuration requise : PC Pentium; Windows XP; Microsoft Office 2002, ActiveSync. — Titre de l'étiquette du disque. — ISBN : 978-2-550-58653-1 : gratuit.

GIRARD, D., J. GAGNON et C.-G. LANGLOIS, 2001. PLANTEC : *un logiciel pour gérer la fertilisation des plants dans les pépinières forestières.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 111. 8 p. (http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Gagnon-Jean/Note111.pdf).

GIRARD, D., C.-G. LANGLOIS et J. GAGNON, 1993. PLANTEC : *a software to manage the growth and nutrition of seedlings produced in forest nurseries.* Affiche présentée au 12th International Plant Nutrition Colloquium, Perth, Western Australia, 21-26 septembre 1993.

GIRARD, D., C.-G. LANGLOIS et J. GAGNON, 1995, PLANTEC : *un outil informatique conçu pour aider les producteurs à gérer la croissance et la fertilisation des plants en pépinière.* Affiche présentée au Symposium FAO Québec 1995, Centre des congrès de Québec, Québec, 11-14 octobre 1995.

LAMBANY, G., M. RENAUD et M. BEAUCHESNE, 1997. *Control of growing medium water content and its effect on small seedlings grown in large containers.* Tree Planters' Notes, 48 : 48-54.

LAMBANY, G., L. ROBIDAS et P. BALLESTER, 1996. *Measurement of soil water content in a peat-vermiculite medium using time domain reflectometry (TDR) : A laboratory and field evaluation.* Tree Planters' Notes, 47 : 88-93.

LAMHAMEDI, M.S. et J. GAGNON, 2003. *Nouvelles technologies de production de plants forestiers au Québec et leur intégration dans les programmes de reboisement des pays en voie de développement.* Note de recherche forestière n° 120, 8 p. (Cette note a aussi fait l'objet d'un mémoire soumis et accepté au XIIe Congrès forestier mondial 2003). http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Note120.pdf

LAMHAMEDI, M.S., M. RENAUD et H. A. MARGOLIS, 2002. *La réflectométrie dans le domaine temporel : une technique d'optimisation de l'irrigation et de réduction du lessivage en pépinières forestières au Québec.* Cahiers Agricultures 11 : 275-283.

LAMHAMEDI, M.S. L. LABBÉ, H.A. MARGOLIS, D.C. STOWE, L. BLAIS et M. RENAUD, 2006. *Spatial variability of substrate water content and growth of white spruce seedlings.* Soil Science Society of America Journal 70 : 108-120.

LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, H. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX et P.Y. BERNIER, 2001. *Growth, physiology and leachate losses in* Picea glauca *seedlings (1 + 0) grown in air-slit containers under different irrigation regimes.* Revue canadienne de recherche forestière 31 : 1968-1980.

LAMHAMEDI, M.S., G. LAMBANY, M. RENAUD, L. VEILLEUX et S. PLAMONDON, 2000. *Gestion de l'irrigation en pépinière et évaluation des semis d'épinette blanche produits dans les récipients à parois ajourées.* Ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière, Sainte-Foy, Québec. Mémoire de recherche forestière n° 138. 36 p. http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Memoire138.pdf

LAMHAMEDI, M.S., H. MARGOLIS, M. RENAUD, L. VEILLEUX, et I. AUGER, 2003. *Effets de différentes régies d'irrigation sur la croissance, la nutrition minérale et le lessivage des éléments nutritifs des semis d'épinette noire (1 + 0) produits en récipients à parois ajourées en pépinière forestière.* Revue canadienne de recherche forestière 33 : 279-291. http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Can-J-For-Res-33-279-291.pdf

LANGLOIS, C.-G., 1986. *La gestion nutritionnelle des conifères produits à racines nues.* Dans : *Comptes rendus du colloque Amendements des sols, perspectives d'avenir.* ITAA de Saint-Hyacinthe, 12 novembre 1986, p. 35-65.

LANGLOIS, C.-G., 1988a. *Le dynamisme de la croissance des plants cultivés dans le récipient 45-110 et les relations entre les variables.* Dans : *Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients.* Compte rendu de l'atelier organisé par le Service du transfert de technologie du ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts) et le Groupe de recherche en productivité végétale (GRPV), Université du Québec à Chicoutimi, les 9 et 10 novembre 1988 à Chicoutimi. p. 1-24.

LANGLOIS, C.-G., 1988b. *Le dynamisme de la nutrition minérale des plants cultivés dans le récipient 45-110 et les relations entre les variables.* Dans : *Troisième atelier québécois sur la culture des plants forestiers en récipients.* Compte rendu de l'atelier organisé par le Service du transfert de technologie du ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts) et le Groupe de recherche en productivité végétale (GRPV), Université du Québec à Chicoutimi, (Chicoutimi), 9 et 10 novembre 1988. p. 43-65.

LANGLOIS, C.-G., 1991. *Cultural monitoring of seedlings : a management tool.* Dans : *Seedling production in Québec : bareroot versus container seedlings.* 1990 Northeastern Nurserymen's Conference Proceedings. p. 39-48.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1987. *Session d'information aux pépiniéristes du MRN sur la fertilisation des plants produits en récipients.* Complexe Scientifique, Sainte-Foy, Québec, 29 septembre 1987.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1988a. *Suivi saisonnier et essais expérimentaux sur les plants cultivés en récipients dans les pépinières forestières.* Ministère de l'Énergie et des Ressources (Secteur Forêts), Direction de la recherche et du développement. 39 p.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1988b. *Session de formation de 45 heures aux pépiniéristes privés sur la fertilisation des plants produits en récipients.* Organisée par le CERFO. Complexe Scientifique, Sainte-Foy, Québec. Dernière semaine de mars 1988.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1990a. *A new nutritional approach for the production of containerized seedlings.* Texte accompagnant une affiche au XIX[e] Congrès mondial de l'IUFRO. Montréal, 6-10 août 1990. 7 p.

LANGLOIS, C.-G. et J. GAGNON, 1990b. *Une nouvelle approche nutritionnelle pour la culture des plants en récipient.* Texte accompagnant une affiche au XIX[e] Congrès mondial de l'IUFRO, Montréal, 6-10 août 1990. 7 p.

LANGLOIS, C.-G., et J. GAGNON, 1993. *A global approach to mineral nutrition based on the growth needs of seedlings produced in forest tree nurseries.* Dans : *Plant Nutrition : from genetic engineering to field practice.* Sous la direction de N.J. Barrow. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas. p. 303-306.

RUNDEL, P.W. et W.M. JARELL, 1991. *Water in the environment.* Dans : *Plant physiological ecology. Field methods and instrumentation.* R.W. Pearcy, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney et P.W. Rundel, éditeurs. Chapman et Hall, New York. p. 29-56.

STOWE, D.C., M.S. LAMHAMEDI, S. CARLES, B. FECTEAU, H.A. MARGOLIS, M. RENAUD et P. BERNIER, 2010. *Managing irrigation to reduce nutrient leaching in containerized white spruce seedling production.* New Forests 40 : 185-204.

STOWE, D.C., M.S. LAMHAMEDI et H. MARGOLIS, 2001. *Water relations, cuticular transpiration, and bud characteristics of air-slit containerized* Picea glauca *seedlings in response to controlled irrigation regime.* Revue canadienne de recherche forestière 31 : 1922-1929. http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Lamhamedi-Mohammed/Can-J-For-Res-31-2200-2212.pdf

TOPP, G.C. et J.L. DAVIS, 1985. *Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling.* Advances in Agronomy 13 : 107-127.

Annexe 1. Liste de toutes les variables du tableau central (Figures 1b et 9)

Les variables en grisé sont utilisées pour les sorties

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison*	Tableau [variable]	Variable de liaison*
1	Identification de la culture (nom unique)	L/rec/h ou-	Obligatoire	-		[38 à 46, 118, 119, 124, 125, 129, 147,148, 151]	
2	Zone**	-	Facultatif **	-			
3	Aire**	-	Facultatif **	-			
4	Portion**	-	Facultatif **	-			
5	Vanne**	-	Facultatif **	-			
6	Matricule**	-	Facultatif **	-			
7	Essence	-	Obligatoire	-		[12]	
8	Âge	-	Obligatoire	-		[12, 35]	
9	Récipient	-	Obligatoire	-		[12, 15 à 28, 134, 135]	
10	Date de livraison (date[numérique] ou prévision[texte])	-	Facultatif	-		[12]	
11	Combinaison substrat-sonde RDT	-	Obligatoire ***	-		[36, 37]	
12	IDCult	-	Calcul	[7, 8, 9, 10]		[35]	
13	Nombre de données de terrain planifiées par culture	-	Obligatoire	-		[122, 123, 124, 125, 147, 148, 151, 159]	
14	Culture sous couvert ou non ?	-	Obligatoire	-		[93, 95]	
15	Densité des cavités	Plants/m²	Calcul	Récipient [2] (1)	[9]		

* Externe au tableau.

** Niveaux d'identification de la culture; facultatifs mais souhaitables. Leur identification et leur portée sont au choix de l'utilisateur.

*** Obligatoire pour les mesures par RDT seulement.

				Référence antécédente		Référence dépendante	
Variable		Unité de mesure	Statut	Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
16	Nombre de cavités / récipient	-	**Calcul**	Récipient [3] (1)	[9]		
17	Volume / cavité	cm^3	**Calcul**	Récipient [4] (1)	[9]		
18	Poids à vide	g	**Calcul**	Récipient [5] (1)	[9]	[65, 66, 67, 130, 131, 136,137,138,139]	
19	Superficie / récipient	m^2	**Calcul**	Récipient [6] (1)	[9]	[90, 96]	
20	Efficacité d'arrosage	%	**Calcul**	Récipient [7] (1)	[9]	[94]	
21	Volume / m^2	cm^3	**Calcul**	Récipient [8] (1)	[9]		
22	Volume / récipient	cm^3	**Calcul**	Récipient [9] (1)	[9]	[65, 66, 67, 98, 100, 130, 131, 136, 137,138]	
23	Longueur de sonde RDT dans le substrat	mm	**Calcul**	Récipient [10] (1)	[9]	[71, 72, 73, 132, 133]	
24	Hauteur des cavités	cm	**Calcul**	Récipient [11] (1)	[9]	[106, 107, 108, 109]	
25	Type de récipient	-	**Calcul**	Récipient [12] (1)	[9]	[91]	
26	Densité du substrat (par défaut)	g/cm^3	**Calcul**	Récipient [13] (1)	[9]	[30]	
27	Poids de la silice (par défaut)	g	**Calcul**	Récipient [14] (1)	[9]	[32]	
28	Poids des accessoires (pour les calculs)	g	**Calcul**	Récipient [15] (1)	[9]	[65, 66,67]	
29	Densité du substrat (correction de la valeur par défaut)	g/cm^3	**Facultatif**	-		[30]	
30	Densité du substrat (pour les calculs)	g/cm^3	**Calcul**	[26, 29]		[69, 70, 71, 103, 131, 136, 137,138,139]	

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
31	Poids de la silice (correction de la valeur par défaut)	g	**Facultatif**	-		[32]	
32	Poids de la silice (pour les calculs)	g	**Calcul**	[27, 31]		[65, 66, 67, 130, 131, 136, 137, 138, 139]	
33	Taux d'occupation (si différent de 100 %)	%	**Facultatif**	-			
34	Taux d'occupation (pour les calculs)	%	**Calcul**	[33]		[35, 130, 131, 136, 137, 138, 139]	
35	Poids des plants frais / récipient	kg	**Calcul**	Biomasse [12] (5)	[12]	[65, 66, 67, 130, 131, 136, 137, 138, 139]	
36	Longueur de sonde	mm	**Calcul**	Sonde RDT [3] (1)	[11]	[71, 72, 73, 132,133]	
37	Rapport Ts/Tair	-	**Calcul**	Sonde RDT [4] (1)	[11]	[71, 72, 73, 132,133]	
38	Pesée moyenne	kg	**Calcul**	Teneur en eau [2] (1)	[1]	[47]	
39	Pesée minimale	kg	**Calcul**	Teneur en eau [3] (1)	[1]	[48]	
40	Pesée maximale	kg	**Calcul**	Teneur en eau [4] (1)	[1]	[49]	
41	Temps moyen (RDT)	ns	**Calcul**	Teneur en eau [5] (1)	[1]	[50]	
42	Temps minimum (RDT)	ns	**Calcul**	Teneur en eau [6] (1)	[1]	[51]	
43	Temps maximum (RDT)	ns	**Calcul**	Teneur en eau [7] (1)	[1]	[52]	
44	Teneur en eau moyenne	%, v/v	**Calcul**	Teneur en eau [8] (1)	[1]	[53]	
45	Teneur en eau minimale	%, v/v	**Calcul**	Teneur en eau [9] (1)	[1]	[54]	

				Référence antécédente		Référence dépendante	
Variable		Unité de mesure	Statut	Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
46	Teneur en eau maximale	%, v/v	**Calcul**	Teneur en eau [10] (1)	[1]	[55]	
47****	PoidsMoy (kg) 2	kg	**Calcul**	[38]		[56]	
48****	PoidsMin (kg)2	kg	**Calcul**	[39]		[57]	
49****	PoidsMax (kg)2	kg	**Calcul**	[40]		[58]	
50****	MP TDMoy2	ns	**Calcul**	[41]		[59]	
51****	MP TDMin2	ns	**Calcul**	[42]		[60]	
52****	MP TDMax2	ns	**Calcul**	[43]		[61]	
53****	EvalMoy 2	%, v/v	**Calcul**	[44]		[62]	
54****	EvalMin 2	%, v/v	**Calcul**	[45]		[63]	
55****	EvalMax 2	%, v/v	**Calcul**	[46]		[64]	
56****	PoidsMoy(kg)	kg	**Calcul**	[47]		[65]	
57****	PoidsMin(kg)	kg	**Calcul**	[48]		[66]	
58****	PoidsMax(kg)	kg	**Calcul**	[49]		[67]	
59****	MP TDMoy3	ns	**Calcul**	[50]		[71]	
60****	MP TDMin3	ns	**Calcul**	[51]		[72]	

**** : Calculs et tests logiques pour afficher un seul %, v/v, sans erreur (#VALEUR!, #NA, #DIV0!,...).

				Référence antécédente		Référence dépendante	
Variable		Unité de mesure	Statut	Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
61****	MP TDMax3	ns	Calcul	[52]		[73]	
62****	EvalMoy 3	%, v/v	Calcul	[53]		[77]	
63****	EvalMin 3	%, v/v	Calcul	[54]		[78]	
64****	EvalMax 3	%, v/v	Calcul	[55]		[82]	
65	Teneur en eau moyenne obtenue par pesée	%, v/v	Calcul	[18, 22, 28, 30, 35, 56(38)]	-	[68]	
66	Teneur en eau minimale obtenue par pesée	%, v/v	Calcul	[18, 22, 28, 30, 35, 57(39)]	-	[69]	
67	Teneur en eau maximale obtenue par pesée	%, v/v	Calcul	[18, 22, 28, 30, 35, 58(40)]	-	[70]	
68****	MoyPesée (v/v)2	%, v/v	Calcul	[65]		[77]	
69****	MinPesée (v/v)2	%, v/v	Calcul	[66]		[78]	
70****	MaxPesée (v/v)2	%, v/v	Calcul	[67]		[82]	
71	Teneur en eau moyenne obtenue par RDT	%, v/v	Calcul	[23, 36, 37, 59(41)]		[74]	
72	Teneur en eau minimale obtenue par RDT	%, v/v	Calcul	[23, 36, 37, 60(42)]		[75]	
73	Teneur en eau maximale obtenue par RDT	%, v/v	Calcul	[23, 36, 37, 61(43)]		[76]	
74****	MoyMP (v/v)2	%, v/v	Calcul	[71]		[77]	
75****	MinMP (v/v)2	%, v/v	Calcul	[72]		[78]	

**** : Calculs et tests logiques pour afficher un seul %, v/v, sans erreur (#VALEUR!, #NA, #DIV0!,...).

Variable		Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
76****	MaxMP (v/v)2	%, v/v	**Calcul**	[73]		[82]	
77	Teneur en eau moyenne (non validée)	%, v/v	**Calcul**	[62(44), 68(65), 74(71)]		[80]	
78	Teneur en eau minimale (non validée)	%, v/v	**Calcul**	[63(45), 69(66), 75(72)]		[79, 81]	
79	Test Logique (absence de minimum)	logique	**Calcul**	[78, 80]		[81]	
80	Teneur en eau moyenne (moyenne des méthodes)	%, v/v	**Calcul**	[77]		[79, 81, 91, 92, 111, 112, 122, 123, 124, 125, 155]	
81	Teneur en eau minimale (moyenne des méthodes)	%, v/v	**Calcul**	[78, 79, 80]		[111, 156]	
82	Teneur en eau maximale (moyenne des méthodes)	%, v/v	**Calcul**	[64, 70, 76]		[112]	
83	Système d'irrigation	-	**Obligatoire**	-		[84, 85, 86, 87, 88, 89]	
84	Système d'irrigation pour vérification	-	**Calcul**	[83], Systèmes d'irrigation [1] (1)	[83]	[85]	
85	Débit pour vérification	mm/h	**Calcul**	[83, 84], Systèmes d'irrigation [2] (1)	[83]	[86, 87, 88, 89, 112]	
86	Débit gicleurs	mm/h	**Calcul**	[83, 85], Systèmes d'irrigation [2] (1)	[83]	[90, 100]	
87	Débit robot	mm/passe	**Calcul**	[85], Systèmes d'irrigation [3] (1)	[83]	[90, 115]	
88	Effic. au vent	%	**Calcul**	[85], Systèmes d'irrigation [4] (1)	[83]	[93]	
89	Efficacité de rétention	%	**Calcul**	[85], Systèmes d'irrigation [5] (1)	[83]	[90]	
90	Débit (L/rec/h ou L/passe)	L/rec/h ou L/rec/pas	**Calcul**	[19, 86, 87, 89]		[99]	

**** : Calculs et tests logiques pour afficher un seul %, v/v, sans erreur (#VALEUR!, #NA, #DIV0!,...).

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
91	Rétention base	%	**Calcul**	[80, Rétention PP ou Rétention PA]	[25]	[91]	
92	Rétention	%	**Calcul**	[80, 91]		[94, 97]	
93	Efficacité d'arrosage	%	**Calcul**	[14, 88, Prévisions météo]		[94]	
94	Absorption	%	**Calcul**	[20, 92, 93]		[99]	
95	Pluie	mm	**Calcul**	[14, Prévisions météo]		[96]	
96	Pluie	L/rec	**Calcul**	[19, 95]		[97]	
97	Pluie retenue	L/rec	**Calcul**	[92, 96]		[98]	
98	Pluie retenue	%, v/v	**Calcul**	[22, 97]		[112]	
99	Irrigation retenue	L/rec/h ou L/rec/pas	**Calcul**	[90, 94]		[100]	
100	Taux d'augmentation de teneur en eau	[%v/v]/min ou passe	**Calcul**	[22, 86, 99]		[114]	
101	Affaissement de la tourbe (entre la surface et le rebord)	cm	**Facultatif**	-		[106, 107, 108, 109]	
102	Moyenne inférieure acceptable (stratégie par moyenne)	%, v/v	**Obligatoire**	-		[106, 111, 136, 155, 156]	
103	Cible moyenne à atteindre (stratégie par moyenne)	%, v/v	**Obligatoire**	-		[107]	
104	Seuil inférieur acceptable (stratégie par limite)	%, v/v	**Obligatoire**	-		[108, 111, 138, 156]	
105	Cible supérieure maximale (stratégie par limite)	%, v/v	**Obligatoire**	-		[109]	

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
106	Moyenne inf. corrigée pour affaissement	%, v/v	**Calcul**	[24, 101, 102]			
107	Cible corrigée pour affaissement (moyenne)	%, v/v	**Calcul**	[24, 101, 103]		[112, 137]	
108	Limite inférieure corrigée pour affaissement (limite)	%, v/v	**Calcul**	[24, 101, 104]			
109	Cible max. corrigée pour affaissement (limite)	%, v/v	**Calcul**	[24, 101, 105]		[112, 139]	
110	Méthode	-	**Obligatoire**	-		[111, 112, 155,156]	
111	Irrigation requise ? (oui/non)	logique	**Calcul**	[80, 81, 102, 104, 110]		[112, 143]	
112	Besoin brut	%, v/v	**Calcul**	[80, 82, 98, 107, 109, 110, 111]		[113]	
113	Besoin	%, v/v	**Calcul**	[112]		[114]	
114	Irrigation	minutes, passes ou mm	**Calcul**	[100, 113]		[116]	
115	Unité	-	**Calcul**	[85, 87]		[117]	
116	**Irrigation (confirmée)**	minutes, passes ou mm	**Calcul**	[114]			
117	**Unité (confirmée)**	-	**Calcul**	[115]			
118	Code (bordure tour)	-	**Calcul**	Teneur en eau [11] (1)	[1]	[120]	
119	Code (bordure centre)	-	**Calcul**	Teneur en eau [12] (1)	[1]	[121]	
120	Code (bordure tour) certifié	-	**Calcul**	[118]		[122, 143]	

				Référence antécédente		Référence dépendante	
Variable		Unité de mesure	Statut	Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
121	Code (bordure centre) certifié	-	**Calcul**	[119]		[123, 143]	
122	**Tour**	-	**Calcul**	[120]			
123	**Centre**	-	**Calcul**	[121]			
124	Heure 1	-	**Calcul**	[13, 80], Teneur en eau [13] (1)	[1]	[126]	
125	Remarque 1	-	**Calcul**	[13, 80] Saisie[4] (1)	[1]	[127]	
126	**Heure de terrain confirmée**	-	**Calcul**	[124]			
127	Remarque de terrain confirmée	-	**Calcul**	[125]		[145]	
128	**Message**	-	**Facultatif**	-			
129	Copie de l'identification	-	**Calcul**	[1]			
130	Poids min.	kg	**Calcul**	[18, 22, 30, 32, 34, 35, 134]		Saisie [] (1)	[1]
131	Poids max.	kg	**Calcul**	[18, 22, 30, 32, 34, 35, 135]		Saisie [] (1)	[1]
132	TD min	ns	**Calcul**	[23, 36, 37, 134]		Saisie [] (1)	[1]
133	TD max	ns	**Calcul**	[23, 36, 37, 135]		Saisie [] (1)	[1]
134	Valeur inférieure possible	%, v/v	**Calcul**	[9], Récipients [16] (1)		[130, 132]	
135	Valeur supérieure possible	%, v/v	**Calcul**	[9], Récipients [17] (1)		[131, 133]	

				Référence antécédente		Référence dépendante	
Variable		Unité de mesure	Statut	Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
136	Valeur min. %v/v convertie en kg (moy)	kg	**Calcul**	[18, 22, 30, 32, 34, 35, 106]			
137	Cible max. %v/v convertie en kg (moy)	kg	**Calcul**	[18, 22, 30, 32, 34, 35, 107]			
138	Valeur min. %v/v convertie en kg (lim)	kg	**Calcul**	[18, 22, 30, 32, 34, 35, 108]			
139	Cible max. %v/v convertie en kg (lim)	kg	**Calcul**	[18, 22, 30, 32, 34, 35, 109]			
140	Attention; délai expiré, près de limite ou irrig. non prescrite	-	**Calcul**	[141, 142, 143]		[144]	
141	Filtre délai expiré	logique	**Calcul**	[150], Délai (Paramètres système)		[140]	
142	FiltreAS PrèsLim	logique	**Calcul**	[155, 156]		[140]	
143	Filtre Irrig	logique	**Calcul**	[111, 120, 121]		[140]	
144	Filtre Notes	logique	**Calcul**	[140, 145]			
145	Filtre int (Rem)	logique	**Calcul**	[127]		[144, 146]	
146	Filtre (Rem)	logique	**Calcul**	[145]			
147	Dern Moy Base	%, v/v	**Calcul**	[13], Archives[16] (14)	[1]	[150, 152]	
148	Jr Depuis Base	-	**Calcul**	[13], Archives[15] (14)	[1]	[149]	
149	Jr Depuis Doute	-	**Calcul**	[148]		[150]	
150	Jr Depuis Base	-	**Calcul**	[147, 149, 159]		[153, 141]	

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
151	Irrig Depuis Base	-	**Calcul**	[13], Archives[17] (14)	[1]	[154]	
152	Dern Moy	%, v/v	**Calcul**	[147]		[155, 156]	
153	Jr Depuis	-	**Calcul**	[150]		[158]	
154	Irrig Depuis	logique	**Calcul**	[151]			
155	SiMoyDoute	logique	**Calcul**	[80, 102, 152], (Paramètres système)		[142, 157]	
156	SiLimDoute	logique	**Calcul**	[81, 102, 104, 110, 152], (Paramètres système)		[142, 157]	
157	À suivre	logique	**Calcul**	[155, 156]			
158	Delai expiré	logique	**Calcul**	[157]			
159	Participation prévue aux mesures	logique	**Calcul**	[17]		[150, 154]	

Annexe 2. Liste des variables du tableau des caractéristiques des systèmes d'irrigation (Figure 1c)

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison*	Tableau [variable]	Variable de liaison*
1	Système	-	**Obligatoire**				
2	Débit (1)	mm/h	**Obligatoire****			Tableau central [86] (83)	[1]
3	Débit (2)	mm/passe	**Obligatoire****			Tableau central [87] (83)	[1]
4	Efficacité au vent	%	**Obligatoire**			Tableau central [88] (83)	[1]
5	Rétention	%	**Obligatoire**			Tableau central [89] (83)	[1]

* Externe au tableau.

** Un seul type de débit par système d'irrigation (mm/h ou mm/passage).

Annexe 3. Liste des variables du tableau des caractéristiques des récipients (Figures 1d et 6)

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison*	Tableau [variable]	Variable de liaison*
1	Récipient	-	**Obligatoire**				
2	Densité des cavités	Plants/m²	**Obligatoire**			Tableau central [15] (9)	[1]
3	Nombre de cavités/récipient	-	**Obligatoire**			Tableau central [16] (9), Biomasse [6] (3)	[1]
4	Volume/cavité	cm³	**Obligatoire**			Tableau central [17] (9)	[1]
5	Poids à vide	g	**Obligatoire (pesée)**			Tableau central [18] (9)	[1]
6	Superficie/récipient	m²	**Obligatoire**			Tableau central [19] (9)	[1]
7	Efficacité d'arrosage	%	**Obligatoire**			Tableau central [20] (9)	[1]
8	Volume/m²	cm³	**Calcul**	[2, 4]	-	Tableau central [21] (9)	[1]
9	Volume/récipient	cm³	**Calcul**	[3, 4]	-	Tableau central [22] (9)	[1]
10	Longueur de sonde RDT dans le substrat	mm	**Obligatoire (RDT)**			Tableau central [23] (9)	[1]
11	Hauteur des cavités	cm	**Obligatoire**			Tableau central [24] (9)	[1]
12	Type de récipient	-	**Obligatoire**			Tableau central [25] (9)	[1]

* Externe au tableau.

				Référence antécédente		Référence dépendante	
Variable		Unité de mesure	Statut	Tableau [variable]	Variable de liaison	Tableau [variable]	Variable de liaison
13	Densité du substrat (par défaut)	g/cm³	**Obligatoire (pesée)**			Tableau central [26] (9)	[1]
14	Poids de la silice (par défaut)	g	**Obligatoire (pesée)**			Tableau central [27] (9)	[1]
15	Poids des accessoires	g	**Obligatoire (pesée)**			Tableau central [28] (9)	[1]
16	%v/v minimum possible (vérification des mesures)	%	**Obligatoire**			Tableau central [134] (129)	[1]
17	%v/v maximum possible (vérification des mesures)	%	**Obligatoire**			Tableau central [135] (129)	[1]

Annexe 4. Liste des variables du tableau d'évolution des masses sèches (« biomasses ») (Figures 1e et 7)

	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison*	Tableau [variable]	Variable de liaison*
1	Essence	-	**Obligatoire**			[5]	
2	Âge	-	**Obligatoire**			[5]	
3	Récipient	-	**Obligatoire**			[5, 9]	
4	Date de livraison	-	**Facultatif**			[5]	
5	Identification complète	-	**Calcul**	[1, 2, 3, 4]	-		
6	Nombre de plants par récipient	-	**Calcul**	Récipients [3] (1)	[3]		
7	Masse de début	mg	**Obligatoire**				
8	Masse de fin	mg	**Obligatoire**				
9	Fin corrigée**	mg	**Calcul**	[Profil d'évolution de biomasse %] + [7, 8]	[4]		
10	Masse sèche pour un plant	mg	**Calcul**	[Profil d'évolution de biomasse %] + [7, 9]	[Date]***		
11	Masse fraîche pour un plant	mg	**Calcul**	[Profil d'évolution plant frais/ sec] + [1]	[Date]***		
12	Masse fraîche pour un récipient****	kg	**Calcul**	[6, 11]	-	Tableau central [35] (12)	[5]

* Externe au tableau.

** Basé sur la masse de fin, à la date de livraison (si indiquée numériquement) ou de fin normale (si non indiquée ou sous forme caractère), ainsi que sur le profil d'évolution de biomasse, pour une projection théorique générale de la biomasse, à la fin normale de saison de croissance.

*** Constante du tableau.

**** Pour un taux d'occupation de 100 % (corrigé dans le tableau central pour un taux inférieur).

Note : Le tableau des biomasses comporte deux dimensions supplémentaires composé de 548 dates (du 1er janvier de l'année X au 1er juillet de l'année X+1) et de 6 profils (Biomasse %, ainsi que les rapports plant frais/sec de 5 espèces) pour chacune des dates. Les profils sont déterminés par des modèles mathématiques (de type; $y=m(1/(1+e^{-(ax+b)}))+k$, pour la biomasse et de type; $y=b+a(1/(K(2PI)^{0.5}))e^{-0,5*(((X-m)/k)^2)}$ pour les rapports, « x » étant la date).

Annexe 5. Liste des variables du tableau de description des sondes RDT (Figures 1f)

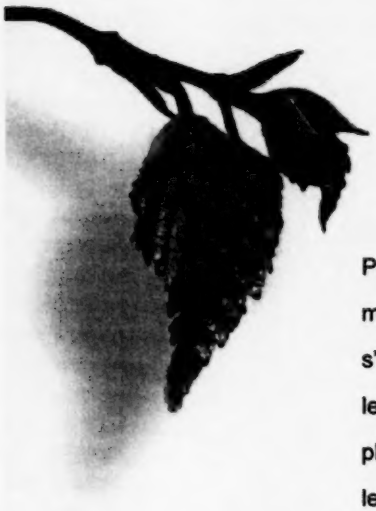
	Variable	Unité de mesure	Statut	Référence antécédente		Référence dépendante	
				Tableau [variable]	Variable de liaison*	Tableau [variable]	Variable de liaison*
1	Combinaison sonde+substrat	-	**Obligatoire**				
2	Identification du substrat	-	**Facultatif**				
3	Longueur de sonde	mm	**Obligatoire**			Tableau central [36] (11)	[1]
4	Rapport T[sol]/T[air]	-	**Obligatoire**			Tableau central [37] (11)	[1]

* Externe au tableau.

Note : Les valeurs des longueurs de sondes et du rapport T[sol]/T[air] sont combinées à la longueur de sonde en contact avec le substrat (Tableau des caractéristiques des récipients; Figures 1d et 7) et à la lecture de temps (ns) pour calculer la teneur en eau du substrat (%, v/v) selon la formule suivante :

Teneur en eau (%, v/v) = 12,56*(((T-(2*(Ls - LsS)/VL))/(2*LsS/VL))-TsTair)
Ou :
T : Lecture "Time Delay" (ns)
Ls : Longueur de la sonde (mm)
LsS : Logueur de la sonde dans le substrat (mm)
VL : Vitesse de la lumière (299,704 mm/ns)
TsTair : Rapport Temps[sol] / Temps[air]

12,56 : Facteur lié à la constante diélectrique de l'eau



Pour satisfaire ses objectifs de reboisement, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune s'assure qu'on met bien tout en œuvre pour optimiser les techniques de culture, lors de la production des plants en pépinière. Les recherches entreprises par le Ministère, sur l'optimisation de l'irrigation et de la nutrition minérale, constituent des éléments essentiels à la production de plants de qualité supérieure et à la protection de la qualité des eaux souterraines. Ces travaux ont permis la conception de systèmes informatisés, afin d'aider les pépiniéristes à atteindre ces objectifs.

Ressources naturelles et Faune
Québec

Le papier des pages intérieures de ce Mémoire de recherche forestière est fabriqué à 100% avec des fibres recyclées.